

~~TH-K85~~

TH-FC6

**INFLUENCE DES MATIERES
ORGANIQUES SUR LES PROPRIETES
PHYSIQUES ET MECANIQUES DES
SOLS**

I.N.A.-P.G. Stage de fin d'étude

GRISON Denis

Août 1985

Je tiens à remercier **Pierre STENGEL**, Directeur de la Station de Science du Sol et **Jérôme GUERIF** qui a dirigé ce travail.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidé et encadré dans la réalisation de ce mémoire.

PLAN

Introduction

1. Justification de l'étude et des méthodes

1.1. Justification de l'étude

1.1.1 Le potentiel et la relation potentiel teneur en eau

1.1.2 Le phénomène de gonflement retrait

1.1.3 Le comportement à la rupture - La résistance à l'écrasement

1.1.4 Conclusion

1.2. Justification générale des méthodes

1.2.1 Le choix des échantillons de terre

1.2.2 Méthode de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des sols à l'échelle texturale

2. Matériel et Méthode

2.1. Description des échantillons de sol

2.2. Préparation des agrégats

2.3. Les courbes de potentiel

2.4. Les courbes de gonflement-retrait

2.5. La mesure de la force d'écrasement

3. Mesures des résistances à l'écrasement - Problèmes méthodologiques

3.1. Le calcul de la résistance à l'écrasement

3.2. L'influence de l'humidité

3.3. L'influence du diamètre

3.4. L'interprétation de la résistance à l'écrasement d'une population d'agrégats

3.5. L'influence de la forme des agrégats sur l'évaluation de la résistance à l'écrasement d'un sol - justification de l'arrondi.

4. Résultats

4.1. Densité d'agrégats secs

4.1.1 Choix des agrégats

4.1.2 Influence de la teneur en carbone

4.1.3 Les résultats de la porosimétrie à mercure

- 4.2. Relation potentiel teneur en eau
- 4.3. Retrait gonflement
 - 4.3.1 Rappels bibliographiques
 - 4.3.2 Résultats
 - 4.3.3 Discussion et conclusion
- 4.4. Résistance à l'écrasement d'agrégats arrondis
 - 4.4.1 Agrégats secs
 - 4.4.2 Relation teneur en M.O.-Résistance à l'écrasement pour les différents sols.
 - 4.4.3 Conclusion
- 4.5. Influence de l'humidité

Conclusion

Références Bibliographiques

Annexes

INTRODUCTION

L'enrichissement en matière organique (M.O.) des sols cultivés est généralement considéré comme un moyen d'améliorer leurs propriétés physiques. La baisse des teneurs en M.O. enregistrée ces dernières décennies dans les sols des régions de cultures intensives est également invoquée comme un des principaux facteurs explicatifs de leur dégradation physique.

De nombreux travaux expérimentaux de terrain concluent à l'existence d'un effet positif de l'enrichissement en M.O. sur certains comportements physiques : stabilité structurale, sensibilité au compactage par exemple (GUERIF, 1984). Les études analytiques portant sur l'effet des M.O. sur un comportement élémentaire sont moins nombreuses. Si elles font le plus souvent ressortir un effet "bénéfique" de M.O., les résultats en apparaissent fréquemment contradictoires et en tout cas trop partiels ou particuliers pour apporter une vision globale du rôle des M.O. dans les propriétés physiques du sol, encore moins une prévision de ses diverses conséquences in-situ. Les études systématiques réalisées dans le cas de la stabilité structurale échappent à cette critique, mais le comportement physique étudié est lui-même trop complexe pour que leurs résultats soient directement utilisables pour aborder d'autres phénomènes que la dégradation structurale par l'eau. Il intègre en effet des mécanismes multiples : cinétique d'humectation, variation de cohésion, gonflement

L'objet de ce mémoire est d'étudier un ensemble réduit de comportements et/ou propriétés physiques, déterminant pour les différents processus d'évolution structurale et leur variation en fonction de la teneur en M.O.

Ce sont :

- le retrait-gonflement
- la rétention d'eau
- la résistance mécanique

Afin d'éliminer les effets indirects, et fortement variables dans le temps des M.O., qui résultent de leurs actions sur la structure (au sens d'organisation macroscopique, telle qu'elle est observée directement en place), nous nous limiterons à l'échelle de l'arrangement des constituants élémentaires, c'est-à-dire celle de l'assemblage textural.

Par ailleurs, compte-tenu des difficultés considérables de l'étude expérimentale de l'influence physique des matières organiques, dues à la multiplicité de leurs modes d'action et de leurs interactions avec d'autres facteurs, nous accorderons une part importante à la mise au point méthodologique, qui constitue la première partie de ce mémoire.

1. JUSTIFICATION DE L'ETUDE ET DES METHODES

1.1 Justification de l'étude

Nous avons choisi d'approcher la relation entre teneur en M.O. et propriétés physiques et mécaniques d'un sol à travers l'étude de 3 variables mesurées à l'échelle texturale :

- Le potentiel hydrique
- Le retrait-gonflement
- La résistance à l'écrasement.

Nous nous proposons, dans ce chapitre, de justifier le choix de chacune d'elle et l'intérêt de leur étude simultanée, et de faire le point sur les connaissances actuelles relatives à l'influence de la M.O. sur ces 3 variables.

1.1.1 Le potentiel et la relation potentiel-teneur en eau

Le potentiel est une bien meilleure variable de caractérisation de l'état hydrique d'un sol que sa seule teneur en eau, dont la signification au niveau des comportements physiques et mécaniques varie avec la texture.

En indiquant globalement l'énergie de liaison entre l'eau et le milieu poreux que constitue le sol, le potentiel est, a priori, la meilleure variable explicative des comportements physiques et mécaniques sensibles aux variations de l'état d'hydratation.

Les matières organiques, à la fois par leurs propriétés d'hydratation propres, par les modifications de la mouillabilité des associations organo-minérales et par les modifications des assemblages des constituants minéraux qu'elles induisent, modifient -dans certains cas considérablement- la relation potentiel-teneur en eau.

L'étude de cette relation pose des problèmes techniques de deux ordres :

- L'humectation-dessiccation des associations organo-minérales présente une hystéresis marquée. La branche de courbe correspondant à la dessiccation peut être obtenue aisément avec les techniques habituelles utilisées pour les minéraux purs (presses à plaque et à membrane). Mais l'obtention de la courbe en humectation est rendue délicate par les cinétiques d'hydratation des produits organiques et par l'évolution dans le temps de la mouillabilité des associations organo-minérales.

- Les mesures permettant d'établir la relation potentiel-teneur en eau, nécessitent dans tous les cas des temps d'équilibre relativement longs. Pour éviter entre autres, des développements mycéliens susceptibles de modifier les phénomènes étudiés, il convient de bloquer toute évolution des matières organiques.

On trouve, dans la littérature, relativement peu de travaux concernant l'influence des matières organiques sur les propriétés de rétention des sols.

La plupart d'entre eux font état de relations statistiques entre la teneur en eau pour des potentiels particuliers (capacité de rétention, point de flétrissement) et la teneur en matières organiques, associée ou non aux teneurs en argile et en limon (HOLLIS, 1977).

Les résultats obtenus par HARTMANN (1976) sur des sols sableux, très pauvres en argile (10 % de 0-2 μ m) montrent une influence marquée des matières organiques sur la réserve utile, consécutive à une forte augmentation de la rétention d'eau aux faibles succions (pF_2).

Les résultats de HAMBLIN (1977) semblent montrer que les matériaux très riches en éléments fins (80 % de 0-5 μ) présentent le même type de phénomène : c'est-à-dire une augmentation de rétention aux faibles succions.

QUIRK et PANABOKKE (1962) semblent trouver une identité des courbes pF -teneur en eau, pour 2 sols identiques, pauvres en argile (10 %) et à teneur en M.O. différentes (1,3 et 2,7 %).

Par contre, pour les matériaux dont la granulométrie est étalée, une augmentation de la teneur en M.O. semble provoquer une translation de la courbe potentiel-teneur en eau, l'incrément de teneur en eau résultant étant constant et indépendant de la succion appliquée. Cette augmentation identique des teneurs en eau à la capacité de rétention et au point de flétrissement n'induit donc pas de modification de la réserve utile.

1.1.2 Le phénomène de gonflement-retrait

L'humectation et la dessiccation des couches de surface provoquent des variations de leur masse volumique. Comme la structure, ces phénomènes de gonflement-retrait sont étudiés à différents niveaux. Nous privilégierons ici l'échelle de l'assemblage des constituants élémentaires.

Quant aux problèmes méthodologiques, les difficultés rencontrées pour l'étude du gonflement-retrait sont identiques à celles qui ont été mentionnées pour l'humectation-dessiccation. Elles conduisent de la même façon et pour les mêmes raisons à aborder de préférence le phénomène dans le sens des humidités décroissantes, c'est-à-dire le retrait plutôt que le gonflement.

Les quelques résultats actuellement disponibles semblent montrer que les M.O. de sol, toutes fractions confondues, diminuent l'amplitude des variations de volume (GUERIF, non publié) et essentiellement en diminuant la masse volumique à l'état sec, mesurée sur agrégats de 2 ou 3 mm de diamètre.

On peut penser que ceci résulte essentiellement de l'action des matières organiques libres qui modifient l'arrangement des constituants au niveau textural.

En tout état de cause, il semble que les courbes de retrait de matériaux terreux contenant de la matière organique (et mesurée sur agrégats de 2-3 mm de diamètre) conservent la même allure générale : retrait normal le long de la droite de saturation ou parallèlement à cette droite, retrait résiduel du point d'entrée d'air à la limite de retrait, et pallier horizontal jusqu'à l'état sec.

1.1.3 Le comportement à la rupture - La résistance à l'écrasement

L'influence des M.O. sur le comportement des sols à la rupture est très peu étudiée.

Ce comportement intéresse, bien entendu, les agronomes car il concerne directement les conditions de travail du sol et les conditions mécaniques d'implantation du système racinaire. Mais il concerne aussi indirectement de nombreux comportements tels que la stabilité structurale ou les phénomènes de tassement.

Dans les théories de la rupture les plus classiques, et notamment dans la théorie de Coulomb, on caractérise un échantillon, dans un état physique donné, par deux paramètres : la cohésion et l'angle de frottement interne.

Il existe différents tests, plus ou moins standardisés, permettant d'obtenir une évaluation quantitative de ces deux paramètres. Ils se ramènent tous à des mesures de la force nécessaire pour provoquer la rupture des échantillons. Seules les conditions d'application et de contrôle des différentes contraintes à la rupture varient.

Dans la majeure partie des cas, on évalue la résistance à l'écrasement en conditions non confinées (compression simple) soit sur éprouvettes géométriquement définies remaniées ou non soit sur agrégats naturels (de taille variable).

Elle dépend de plusieurs facteurs :

- Le volume et la forme de l'échantillon qui conditionnent le choix du modèle permettant de convertir la force mesurée en contrainte et de comparer divers échantillons entre eux ;

- L'homogénéité de répartition des constituants tant minéraux qu'organiques dans les éprouvettes ou agrégats testés ;

- La continuité de la structure des éprouvettes ou agrégats. En effet, la cohésion d'un échantillon dépend des dimensions relatives de la maille de fissuration et de l'échantillon soumis à compression ;

Celles-ci résultent de l'interaction entre constitutions minérale et organique/histoire hydrique (alternance humectation-dessiccation) / volume de l'éprouvette ou de l'agrégat.

Certains auteurs contournent cette difficulté en remaniant les échantillons pour leur conférer une structure continue.

Les principaux résultats sont les suivants : sur un échantillonnage de matériaux pour lesquels la gamme de variation de teneur en M.O. est très étendue (0-40 %), FRANKLIN et al. (1973) observent que la résistance à l'écrasement diminue quand la teneur en M.O. augmente.

Une telle gamme de variation traduit essentiellement une variation de teneur en M.O. libres (tourbes), et on peut interpréter le rôle des M.O. comme l'introduction d'un facteur d'hétérogénéité et de discontinuité dans l'éprouvette.

Cependant, dans la gamme de variation maximale compatible avec les sols agricoles (0-10 %), la dispersion des résultats, interdit raisonnablement, d'en tirer quelque tendance que ce soit.

QUIRK et PANABOKKE (1961) travaillant sur un sol à 10 % d'argile montrent qu'une augmentation de teneur en M.O. (de 1,3 à 2,7 %) induit une augmentation de la cohésion d'agrégats naturels.

CLARKE et al. (1967) trouvent au contraire sur un sol semblable plus riche en argile (18 %), une diminution de la cohésion des agrégats après 3 ans sous prairie. La densité de ces agrégats est aussi plus faible. Bien qu'ils ne le mentionnent pas, il est probable que le système racinaire ramifié d'une prairie induise une micro-fissuration des agrégats. En comparant leurs résultats avec ceux de QUIRK et PANABOKKE (1962), ils mettent en cause la nature de la M.O.. Les polysaccharides induisent une augmentation de la cohésion des agrégats (résultat assez général GUKERT, 1973 ; THENG, 1979) mais cela nécessite de longues périodes sous prairie.

GRIERSON et al. (1972) trouvent des résultats contradictoires avec les précédents en travaillant sur 4 couples de sol (chaque couple comporte un sol riche et un sol pauvre en M.O.) :

- Sur 2 sols (9 et 30 % d'argile), une augmentation de la teneur en M.O. induit une diminution de la résistance à la rupture d'agrégats naturels ;
- Sur 2 sols à 15 et 18 % d'argile, ils constatent l'inverse.

ROGOWSKY et DON KIRKHAM (1968 ; 1976) recherchent l'influence de la taille, de la densité, de la teneur en argile, de la teneur en carbone d'agrégats naturels. Certaines grandes tendances se dégagent :

- La résistance à l'écrasement est corrélée positivement à la teneur en argile et à la densité de solide.

- Pour 2 sols à 30 et 50 % d'argile, une augmentation de la taille des agrégats (de 0,2 à 0,8 mm) induit une diminution de la cohésion. Ce phénomène est interprété comme étant dû à une micro-fissuration des agrégats argileux qui augmente avec leur taille.

Ils montrent, en tout cas, la difficulté d'isoler l'effet d'un facteur et notamment celui de la M.O. compte tenu des diverses interactions entre teneur en argile, teneur en M.O. et masse volumique.

Lorsque la teneur en argile est très faible (HARTGE, 1975), la cohésion ainsi que l'angle de frottement interne augmentent avec la teneur en M.O.. A l'état sec, cette action des M.O. est nulle, par contre elle se manifeste lorsqu'elles sont hydratées. Pour les deux valeurs de potentiels testés par l'auteur ($\Psi = -100$ mb et $\Psi = -300$ mb), leur effet est d'autant plus marqué que la teneur en eau est élevée. L'auteur interprète ces résultats par une modification des ménisques d'eau par les matières organiques susceptible d'augmenter les phénomènes d'adhésion.

Ces résultats précédents semblent assez disparates et parfois contradictoires. Certains paramètres mal maîtrisés pourraient en effet constituer une source de variabilité des résultats obtenus :

- La forme et le volume des agrégats naturels sont variables : la plupart des auteurs choisissent les agrégats les plus proches de la forme sphérique, qui ont environ 1 cm² de section ; la surface de rupture est alors évaluée peu précisément.

- Le nombre d'agrégats nécessaire pour évaluer une résistance moyenne à l'écrasement varie selon les auteurs de 20 à 120.

- L'humidité des agrégats : tous les auteurs font les mesures sur des agrégats secs à l'air. Or, QUIRK et PANABOKKE (1962) montrent bien l'augmentation de la résistance à l'écrasement avec le potentiel jusqu'à $pF = 6,2$. On peut donc se demander dans quelle mesure l'humidité (et donc la résistance à l'écrasement) d'agrégats secs à l'air est constante.

- Le type de M.O. : on peut penser à distinguer M.O. libre et lié et leurs proportions respectives (modèles de MONNIER et al., 1959).

Il sera donc nécessaire, pour bien évaluer cette variable et être capable d'analyser ses variations :

- D'approfondir la méthode de mesure de la résistance à l'écrasement,

- D'isoler l'effet de la M.O. sur la cohésion en essayant de maîtriser les paramètres tels que humidité, texture, densité des échantillons.

1.1.4 Conclusion

Comme nous venons de le voir, nos trois variables de départ ont toujours été étudiées séparément par rapport à l'influence d'une teneur en M.O. alors qu'elles interagissent ensemble dans le comportement d'un sol au champ.

Nous essaierons donc, au cours de ce mémoire, après un approfondissement des méthodes, d'isoler l'effet de la M.O. sur chaque variable de départ, mais aussi d'étudier l'effet de la M.O. quand plusieurs variables interagissent. Nous étudierons essentiellement son effet sur l'interaction résistance à l'écrasement-comportement hydrique.

1.2 Justification générale des méthodes

Nous ne nous intéresserons ici qu'aux méthodes relatives au sujet dans son ensemble. Nous justifierons dans le chapitre suivant, les méthodes de mesure propres à chacun des trois comportements étudiés.

1.2.1 Le choix des échantillons de terre

La diversité de nature de constitution des matières organiques présentes dans le sol est à l'origine de deux démarches qui s'opposent et se complètent parfois :

- Soit l'étude est menée sur des échantillons naturels de sols où la caractérisation de la M.O. est menée à des niveaux divers de fractionnement.
- Soit l'étude se fait après adjonction d'un produit organique à un rapport minéral.

1.2.1.1 Mélange artificiel

Le moyen d'étudier à la fois la variable "teneur" et la spécificité d'action des différentes fractions est d'enrichir à différentes doses un témoin minéral avec divers produits organiques (fractions organiques extraites de sol, produits "modèles" choisis pour leur similitude avec des matières organiques de sol, produits organiques dont on teste l'aptitude en temps que conditionneur de sol).

Néanmoins, certains problèmes se posent :

- Le choix de la nature de la M.O. et l'extension des résultats obtenus en fonction de ce choix à des échantillons naturels et au sol cultivé.
- La répartition de la M.O. dans l'échantillon est conditionnée par le choix du mode d'incorporation ; il comprend à la fois le choix de la technique de mélange et celui de la technique d'élimination de l'eau qui conditionnent dans certains cas l'organisation finale du mélange.

1.2.1.2 Echantillons naturels

Nous avons donc choisi de travailler sur des couples d'échantillons naturels. Pour des raisons d'ordre pratique, nous avons choisi nos échantillons comme suit : pour chaque sol, nous avons constitué un couple d'échantillons riche et pauvre en M.O. :

- Soit en prélevant un échantillon en surface et un en profondeur sur une même station (3 sols correspondant à 2 couples et un triplet),
- Soit par un prélèvement sur deux parcelles voisines (de texture peu différente) soumis à deux itinéraires techniques différents (1 sol correspondant à 1 couple).

Néanmoins, certains problèmes ne sont pas résolus :

- Pour un même sol, nous ne disposons que de deux teneurs en M.O. : il est donc plus difficile de cerner les relations teneur en M.O.-propriétés physiques.

- Il est difficile d'imputer à une fraction organique définie les modifications de telle ou telle propriété physique du sol. En effet, la nature de la M.O. pour deux échantillons d'un même couple n'est pas forcément la même ; on sait, par exemple, que pour un sol soumis à différents systèmes de culture, la répartition $C_{\text{libre}}/C_{\text{lié}}$ ou C/N diffère en fonction du système de culture. Cette répartition varie, de même, avec la profondeur de prélèvement.

- La structure d'un sol ne peut être indépendante des conditions physiques et mécaniques qui lui ont été imposées et en particulier de son histoire hydrique (STENGEL, 1979). Or l'histoire hydrique est dépendante de la couche de sol considérée. Donc, deux échantillons d'un même couple (l'un prélevé en surface et riche en M.O., l'autre prélevé en profondeur et pauvre en M.O.) peuvent avoir des structures différentes indépendamment du facteur M.O. (FIES et STENGEL, 1981, mettent en évidence une différence de densité texturale pour des agrégats remaniés de 2-3 mm en fonction de leur histoire hydrique).

1.2.2 Méthode de caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des sols à l'échelle texturale

Les choix que nous avons fait précédemment :

- D'utiliser des échantillons naturels,
- De nous limiter à l'échelle de l'assemblage des constituants élémentaires d'un sol,

nous conduisent à travailler sur des échantillons de sol naturels d'une taille déterminée.

1.2.2.1 Justification de l'échelle de travail

L'utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol montre bien l'intérêt opérationnel de distinguer une porosité d'origine structurale et une porosité d'origine texturale (STENGEL, 1979). Cette dernière caractérise la part de l'espace poral total qui relève du mode d'assemblage des constituants du sol (MONNIER et al., 1973). Mais il n'y a pas à priori de relation univoque entre densité texturale et arrangement de constituants ; différentes associations peuvent conduire à une même valeur de porosité (FIES et STENGEL, 1981).

Pour un matériau donné à l'état sec, la porosité texturale est, en première approximation, constante alors que la porosité structurale dépend des actions extérieures, aussi bien naturelles qu'anthropiques, que subit le sol (STENGEL, 1979 ; FIES et STENGEL, 1981) montrent effectivement que la constitution du matériau est un facteur explicatif important de la densité texturale in situ des sols. Néanmoins, d'autres facteurs appartenant à "l'histoire du sol" (tels que l'histoire hydrique) peuvent agir conjointement sur le mode d'organisation des constituants.

Notre étude des propriétés physiques et mécaniques des sols se limite à l'échelle texturale. L'ensemble de nos mesures seront donc effectuées sur de petits volumes de sol de façon à éliminer au mieux l'effet "structure".

En pratique, la méthode d'évaluation de la densité texturale consiste à mesurer la densité au pétrole d'agrégats de 2-3 mm (FIES et STENGEL, 1981). Toute notre étude qui dépend étroitement de cette notion se fera donc sur des agrégats d'environ 2-3 mm.

1.2.2.2 Les limites de l'étude sur des agrégats naturels

Elles sont de deux ordres :

D'ordre purement physique : Bien que l'échelle choisie nous assure une certaine homogénéité, l'hétérogénéité inter-agrégats pour un même échantillon dépend de deux facteurs.

- La structure : nous avons vu que l'histoire des agrégats peut être une source d'hétérogénéité.

- La constitution notamment organique : Ainsi, AKROUME (1985), en analysant individuellement des agrégats de 1 à 2 mm, montre l'existence dans un sol recevant 1000 t de fumier/ha/an, de 4 populations différentes pour la teneur en carbone. Ces différences de teneur en M.O. correspondent à des différences d'organisation des agrégats visibles à la loupe binoculaire.

- les agrégats les plus riches en M.O. ont une forme arrondie et rappellent les turricules de vers de terre

- les autres présentent des faces anguleuses lisses.

On peut donc s'attendre à une hétérogénéité inter-agrégats de teneur en M.O. pour les sols qui reçoivent des apports fréquents de M.O..

D'ordre méthodologique :

Elles sont relatives aux méthodes de mesures.

Les courbes de potentiel et de gonflement-retrait, les mesures en teneur en M.O. ou de densité se font sur un ensemble d'agrégats représentatifs de la moyenne de la variable mesurée. Dans ce cas, l'hétérogénéité inter-agrégats n'est pas prise en compte.

Par contre la résistance à l'écrasement se mesure agrégat par agrégat. On est donc obligé de travailler sur une population caractérisée entre autre par une dispersion due à l'hétérogénéité inter-agrégats. Ceci nous confronte à deux problèmes :

- Comme les autres variables ne rendent pas compte de l'hétérogénéité inter-agrégats, il est difficile d'interpréter la dispersion de la résistance à l'écrasement d'agrégats d'une même population.

- La dispersion de la résistance à l'écrasement risque d'être importante, à cause de l'hétérogénéité inter-agrégats qui dépend de deux facteurs (Cf. ci-dessus). Il est donc plus difficile d'avoir un échantillonnage représentatif d'une population d'agrégats (c'est-à-dire d'un sol) et par suite, il sera difficile de mettre en évidence une différence de résistance à l'écrasement de deux populations d'agrégats qui pourra être masquée par la variabilité inter-agrégats.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1 Description des échantillons de sol

On utilise 4 sols dont la teneur en argile varie de 10 à 50 %. Chaque sol est représenté par un couple (ou un triplet) d'échantillons pour obtenir, pour un type de sol, 2 (ou 3) teneurs en M.O. différentes.

Tableau du sol

Nom du sol	Nb. d'échantillons prélevés	Couche de sol prélevée	Denomination de l'échantillon	Lieu de prélèvement
limons de Durance	2	0-20 cm 20-60 cm	Limons 0-20cm Limons 20-60cm	Domaine INRA des Vignerés (Avignon)
Boigneville (Limons)	2	0-6cm (parcelle en semis direct) 0-20 à 25cm (parcelle labourée)	Boigneville L ₂ Boigneville L ₀	Boigneville essai ITCF Essai A Bloc III sous Bloc II
ST Paul	2	0-20 cm 40-60 cm	ST Paul 0-20 cm ST Paul 40-60 cm	Prairie du poste météo Domaine INRA ST Paul (Avignon)
des Vignerés (prélèvement sous serre)	3	0-20 cm 20-60 cm 40-60 cm	Vignerés 0-20cm Vignerés 20-60cm Vignerés 40-60cm	Domaine INRA des Vignerés (Avignon)

	Argile	CEC	Limon		Sable		C _{total}	Clibre	Clie
			fin	grossier	fin	grossier			
Limons 0-20 20-40	13,8	7,6	24,6	22,2	35,6	3,8	2,15	1,2	0,95
	10,5	3,8	24,2	23,5	37,2	4,6	0,61	0,09	0,52
Boigneville L ₂ L ₀	26,7	15,4	30,5	34,8	6,3	1,7	2,19	0,36	1,83
	24,4	13,7	30,4	36,8	6,8	1,6	1,04	0,12	0,92
St Paul 0-20 20-60	30,1	10,8	41,2	13	12,5	3,2	1,35	0,15	1,20
	30,3	9,1	40,9	12,6	13,3	2,9	0,80	0,06	0,74
Les Vigneres 0-20 20-40 40-60	45,8	19,5	36,3	9,6	6,4	1,9	2,26	0,64	1,62
	45,9	18,8	37,3	8,7	6,3	1,8	1,6	0,25	1,35
	49,6	19,7	35	8,3	5	1,5	0,66	0,05	0,61

Tableau 21 : Analyses granulométriques et analyses de la teneur en carbone des 9 échantillons (tout venant)

Sauf pour Boigneville, les échantillons d'un même sol ont été prélevés à différentes profondeurs.

Pour Boigneville, les deux prélèvements ont été faits sur deux parcelles différentes :

- Boigneville L₂ sur une parcelle en semis direct depuis 15 ans. Il n'y a pas de travail du sol. Les résidus de récolte ne sont ni exportés ni enfouis.
- Boigneville L₀ sur une parcelle avec labour traditionnel (0,25 cm) et travail superficiel. Les résidus de récolte sont donc enfouis.

Le sol St Paul a été prélevé sur une prairie qui n'a pas été retournée depuis au moins 15 ans.

Les limons de Durance et les Vignères sont des sols de culture maraîchère sous serre à fort apport annuel de M.O..

Chaque échantillon a été analysé par le laboratoire d'Arras (Cf. Tableau 2.1).

2.2 Préparation des agrégats

2.2.1 Agrégats naturels

Après séchage à l'air, chaque échantillon est concassé manuellement au mortier. Pour augmenter le rendement en agrégats et ne pas induire une microfissuration, on évitera le concassage mécanique.

Les échantillons sont ensuite tamisés dans des tamis à mailles carrées aux dimensions voulues.

2.2.2 Agrégats remaniés

Des cylindres de sol remaniés d'environ 1 dm³ sont préparés, par malaxage à une humidité voisine de 1,9 x He (Humidité équivalente) puis ressuyage ménagé suivant une méthode analogue à celle décrite par FIES et STENGEL (1981) (Cf. Annexe 2). Les agrégats sont ensuite obtenus à partir de ces cylindres comme précédemment.

Cette préparation vise à éliminer la variabilité de densité des agrégats (Cf. § 1.2.2) et notamment à assurer l'homogénéité de la répartition des constituants organiques.

2.3 Les courbes de potentiel

Nous prendrons 7 valeurs de potentiel pour faire la courbe Humidité = f (Potentiel) : 0,05 ; 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 3 ; 5 ; 15 bars.

Pour chaque échantillon, des agrégats naturels de 2-3,15 mm sont préparés et humectés sous vide pendant 48 heures à un potentiel voisin de zéro (- 3 cm d'eau) (Cf. Annexe 1, II.1).

Pour chaque valeur de potentiel, on amène directement les agrégats des 9 échantillons, du potentiel nul (- 3 cm d'eau), à la valeur choisie du potentiel. On utilise une presse à plaque (presse de Richards). L'équilibre est atteint au bout de 48 heures. On prélève alors chaque échantillon dans 2 peses filtres pour avoir deux répétitions de la mesure d'humidité. On prendra la moyenne des deux humidités pour tracer la courbe.

2.4 Les courbes de gonflement-retrait (Cf. Annexe 1)

Des agrégats de 2-3,15 mm sont mis à réhumecter sous vide comme précédemment. Puis, par dessiccation ménagée, on obtient différentes humidités. Pour chaque humidité, le volume des 2 à 3 g d'agrégats est déterminé après saturation dans le pétrole puis ressuyage de l'excès de pétrole et mesure de la poussée d'Archimède dans le même liquide (MONNIER et al., 1973 ; FIES et STENGEL, 1982).

On en déduit la densité ρ_d des agrégats à une humidité donnée :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_H}$$

V_H = Volume des agrégats à une humidité donnée.

M_s = Masse des agrégats à l'état sec.

En portant $\frac{1}{\rho_d} = f(W\%)$, on obtient la courbe de gonflement-retrait.

2.5 La mesure de la force d'écrasement

2.5.1 Principe de la mesure et description du matériel (Cf. Annexe3)

Il s'agit de mesurer la force d'écrasement d'un agrégat de 2-3 mm, c'est-à-dire la force qu'il faut exercer sur l'agrégat pour induire la rupture. On utilisera pour cela une presse à compression simple. L'agrégat est placé sur un plateau solidaire d'un capteur de force, et sous un piston mobile. Ce piston, animé d'un mouvement vertical, exerce sur l'agrégat une force verticale enregistrée par le capteur et transmise à un enregistreur graphique. Le diamètre de l'agrégat est lu sur une vis micrométrique dès que le piston entre en contact avec l'agrégat.

2.5.2 Préparation d'agrégats arrondis

Pour tenter d'éliminer la variabilité liée à la forme des agrégats, nous arrondissons les agrégats comme suit.

Des agrégats de 3-5 mm sont préparés puis arrondis mécaniquement. Dès qu'un arrondi satisfaisant a été obtenu (évaluation à l'oeil), ils sont tamisés en 3 fractions 1-2 mm, 2-3 mm, 3-5 mm. Les agrégats sont triés avant d'être écrasés de façon à ne retenir que les plus proches de la forme sphérique (ce critère de sphéricité est évalué à l'oeil).

2.5.3 Les courbes résistance à l'écrasement en fonction de l'humidité (sur des agrégats de 2-3 mm arrondis Boigneville L_0 et L_2) - (Annexes 3, § 3.2)

2.5.3.1 Les courbes provenant des mesures agrégat par agrégat

Sur chaque agrégat, est mesurée l'humidité et la résistance à l'écrasement à cette humidité.

Les agrégats subissent une humectation puis une dessiccation ménagée (Cf. Annexe 1).

A différents temps (donc pour différentes humidités), on prélève quelques agrégats et chaque agrégat est mis dans un pèse filtre préalablement taré à la balance de précision puis pour chaque agrégat, on opère comme suit :

- Mesure du poids total humide à la balance de précision,
- Mesure, aussitôt après, de la force d'écrasement et du diamètre,
- Séchage pendant 24 heures à 105° C,
- Mesure du poids total sec et de la tare.

On calcule ensuite l'humidité et la résistance à l'écrasement.

En supposant que l'erreur absolue sur une pesée est de l'ordre de 0,2 mg, on a une erreur relative sur l'humidité de l'ordre de 5 %.

2.5.3.2 Les courbes provenant de mesures sur des populations d'agrégats à un potentiel donné

Contrairement au cas précédent, on mesurera ici l'humidité moyenne d'une population d'agrégats et la moyenne des résistances à l'écrasement de chaque agrégat de la populations.

Des agrégats arrondis d'un couple de sol sont portés à deux potentiels (1,5 et 15 bars) dans une presse de Richards. A chaque potentiel et pour chaque couple, on mesure la force d'écrasement de 60 agrégats. L'erreur relative sur l'humidité d'une population d'agrégats est de l'ordre de 5 %.

3. MESURES DE RESISTANCE A L'ECRASEMENT - PROBLEMES METHODOLOGIQUES

3.1 Le calcul de la résistance à l'écrasement - Résultats bibliographiques

HIRAMATSU et OKA (1966) établissent à partir du tenseur des contraintes une formule théorique de la résistance en traction (ou "tensile strength") au centre d'une sphère soumise à une compression simple. Ils en déduisent la formule (1) et vérifient sur des échantillons de roches (dont la valeur des plus grands diamètres varie de 5 à 10 cm) la validité de cette formule.

$$\sigma = K \frac{2 F_0}{\pi d^2} \quad (1)$$

F_0 : Valeur de la force qui induit la rupture appliquée en 2 points opposés par rapport au centre de l'échantillon

d : Distance entre les deux points d'application de la force.

Pour les échantillons de roches homogènes et isotropes, ils trouvent

$$1,21 < K < 1,36$$

Ils montrent que K dépend en particulier de l'élasticité du matériau mais est indépendant de la forme de l'échantillon.

Il est intéressant de noter que, lors de la compression simple, une force compressive F_0 donne naissance à une "force de rupture" qui lui est approximativement perpendiculaire et que l'on interprète comme résistance en traction.

Bien que les agrégats naturels de sol de quelques millimètres de diamètre soient peu homogènes et aient des paramètres d'élasticité difficiles à définir, certains auteurs utilisent la formule (1) pour calculer la résistance en traction au centre de l'agrégat.

La valeur de K varie suivant les auteurs :

ROGOWSKY et DON KIRKHAM (1976) : $K = 1,29$

DEXTER (1978, 1979, 1981) : $K = 0,905$

Aucune justification réelle n'est donnée quant au choix de cette constante, qui, par ailleurs, n'apporte rien quand on ne cherche pas à donner une valeur théorique à cette mesure.

Dans les articles plus anciens (QUIRK et PANABOKKE, 1961 ; CLARKE, GREENLAND et QUIRK, 1967 ; GRIESEN, KIGNE et GREENLAND), les auteurs travaillent sur des agrégats d'environ 1 cm² de section et interprètent seulement la force nécessaire à l'écrasement (F₀).

Pour notre part, nous mesurerons la force nécessaire à l'écrasement F₀. Après avoir vérifié que F₀ est proportionnel à d² et à la surface de rupture, nous calculerons pour éliminer la variabilité induite par la taille des agrégats :

$$\sigma = \frac{4 F}{d^2 \pi}$$

où F : Force à la rupture en kg

d : Diamètre en cm

Nous nous bornons aussi à donner à ces mesures la signification de résistance à l'écrasement sans tenter d'interpréter le tenseur des contraintes en terme de résistance à la traction ou en cohésion.

3.2 L'influence de l'humidité sur la résistance à l'écrasement

Comme tous les auteurs travaillent sur des agrégats secs à l'air, nous nous sommes demandés dans quelle mesure l'humidité a une influence sur la résistance à l'écrasement. Ces courbes $\sigma = f(W\%)$ que nous obtenons (Cf. § 4.5) sont décroissantes et présentent une forte pente pour les faibles humidités.

On peut donc penser que les différences d'humidité d'un jour à l'autre suffisent pour modifier la résistance à l'écrasement. Ceci pourrait expliquer la variabilité, et quelquefois l'incohérence des résultats obtenus par différents auteurs sur des agrégats secs à l'air (Cf. § 1.1.3). Il conviendra donc de maîtriser au mieux l'homogénéité des humidités des agrégats d'une même population (Annexe 3, § 3) en évitant :

- Une réhumectation des agrégats secs à 105° C,
- Une dessiccation des agrégats humides par évaporation dans l'air ambiant.

3.3 L'influence du diamètre sur la force d'écrasement F

Nous avons recherché la relation entre F et la section (πd^2) pour 139 agrégats arrondis St Paul 40-60 répartis comme suit :

Nombre d'agrégats	Classe de diamètre
40	1-2 mm
40	2-3 mm
59	3-5 mm

Nous avons obtenu la régression de la Figure 3₁ :

$$F = - 0,03 + 0,269 \times \pi d^2$$

La constante n'est pas significativement différente de 0. La valeur de la pente de la droite est significativement différente de 0 à moins de 0,1 %.

Ceci confirme la proportionnalité entre la force d'écrasement et le diamètre au carré et justifie la formule $= \frac{4 \times F}{\pi d^2}$: on diminue la variabilité de la force en prenant en compte la valeur de d^2 mesurée sur chaque agrégat.

Le diagramme des résidus (Figure 3₂) montre d'autre part une dispersion plus importante pour une force (calculée à partir de la régression) de plus de 2 kg ce qui correspond à des agrégats de diamètre supérieur à 3 mm. Cet effet serait dû à une plus grande hétérogénéité de densité inter-agrégats et donc à une plus grande dispersion de la résistance à l'écrasement. En effet, quand on augmente la taille des agrégats, on augmente la probabilité qu'ils contiennent des fissures c'est-à-dire que leur espace poral ne soit plus strictement textural.

Le choix d'une taille d'agrégats de 2-3 mm se justifie donc.

3.4 L'interprétation de la résistance à l'écrasement d'une population d'agrégats

Nous avons choisi d'interpréter la résistance à l'écrasement d'un sol à travers la résistance à l'écrasement d'une population d'agrégats. Etant donné l'hétérogénéité inter-agrégats, nous devons travailler sur un nombre d'agrégats représentatifs de cette population pour :

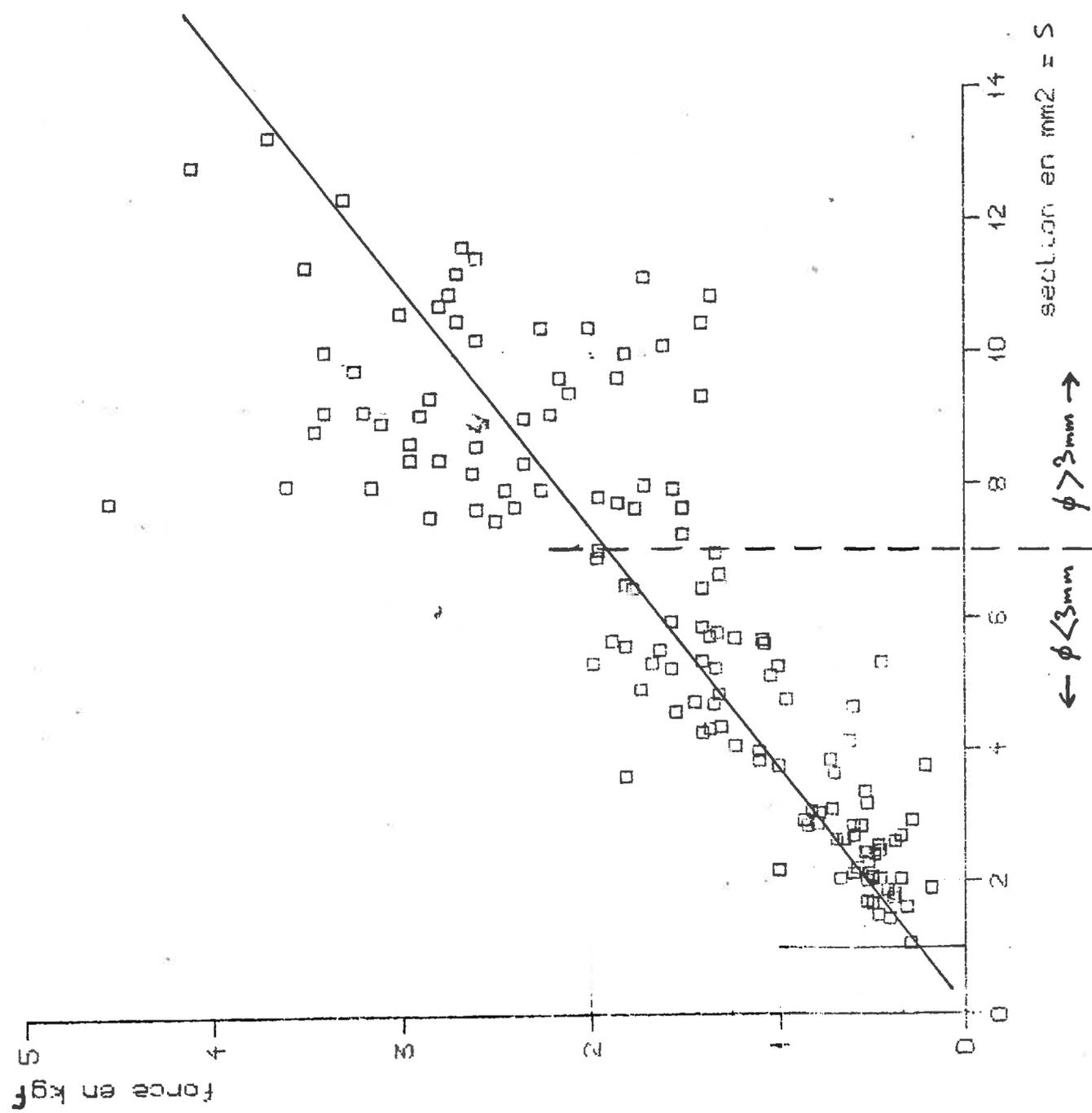


Figure 31 : Influence du diamètre des agrégats sur la force d'écrasement

residuais

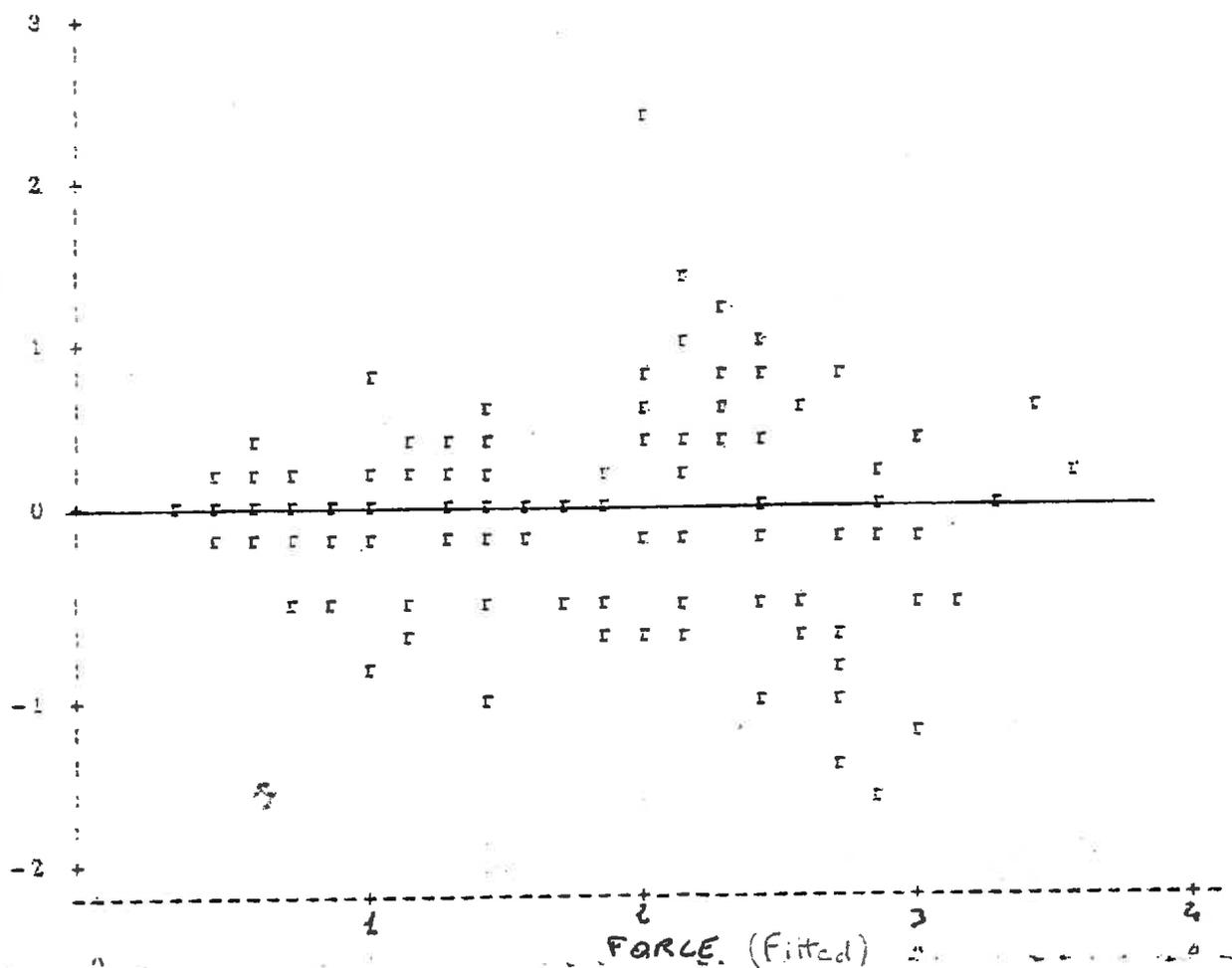


Figure 32 : diagramme des residus de la regression
force d'écrasement = f (section) (Fig 34)

- Etablir l'histogramme de répartition des résistances à l'écrasement des agrégats,
- Calculer la moyenne et de l'écart-type des résistances à l'écrasement des agrégats.

3.4.1 L'histogramme de répartition et les difficultés liées à son interprétation

Il nous permet d'établir la forme de la distribution d'une population (et par exemple de tester sa normalité). Néanmoins, cette forme dépend étroitement du nombre de classes que l'on choisit. On admet couramment que le nombre de classes doit environ être égal à la racine carrée du nombre d'individus.

Pour illustrer la difficulté du choix du nombre de classes, nous avons établi les histogrammes de répartition des résistances à l'écrasement des 2 populations (Cf. Histogrammes des Figures 3₃ à 3₅) :

- 100 agrégats arrondis 2-3 mm Boigneville L₀
- 98 agrégats non arrondis 2-3 mm Boigneville L₀

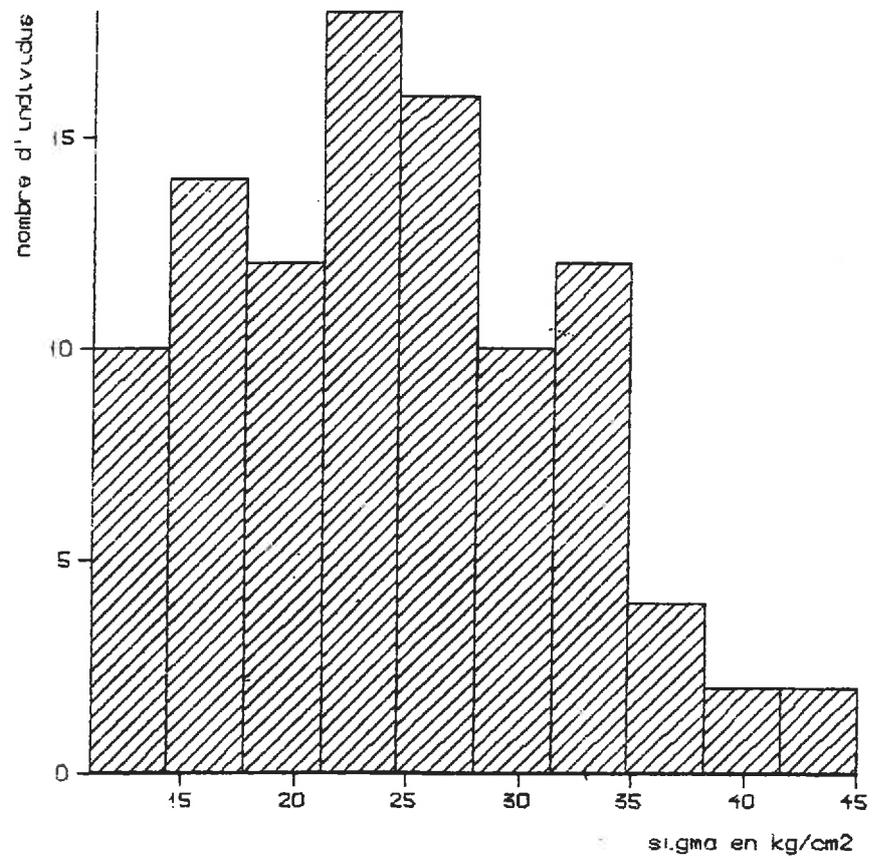
L'histogramme des agrégats arrondis construit avec 10 classes présente une population monomodale alors qu'une construction avec 9 ou 11 classes semble montrer que la population est bimodale. Nous verrons par la suite que cette population est constituée d'agrégats de structure différente et que l'hypothèse bimodale n'est pas à rejeter.

On constate sur l'histogramme des agrégats non arrondis que 10 classes présentent une distribution normale alors que 11 classes font plutôt penser à une distribution bimodale qui correspond mieux avec les résultats sur les agrégats arrondis.

Nous utiliserons donc l'histogramme de distribution pour :

- Discuter de la forme de chaque distribution,
- Interpréter les différences entre populations à l'aide de données statistiques de base (moyenne, écart-type, coefficient de variation)

10 classes
100 individus



11 classes
100 individus

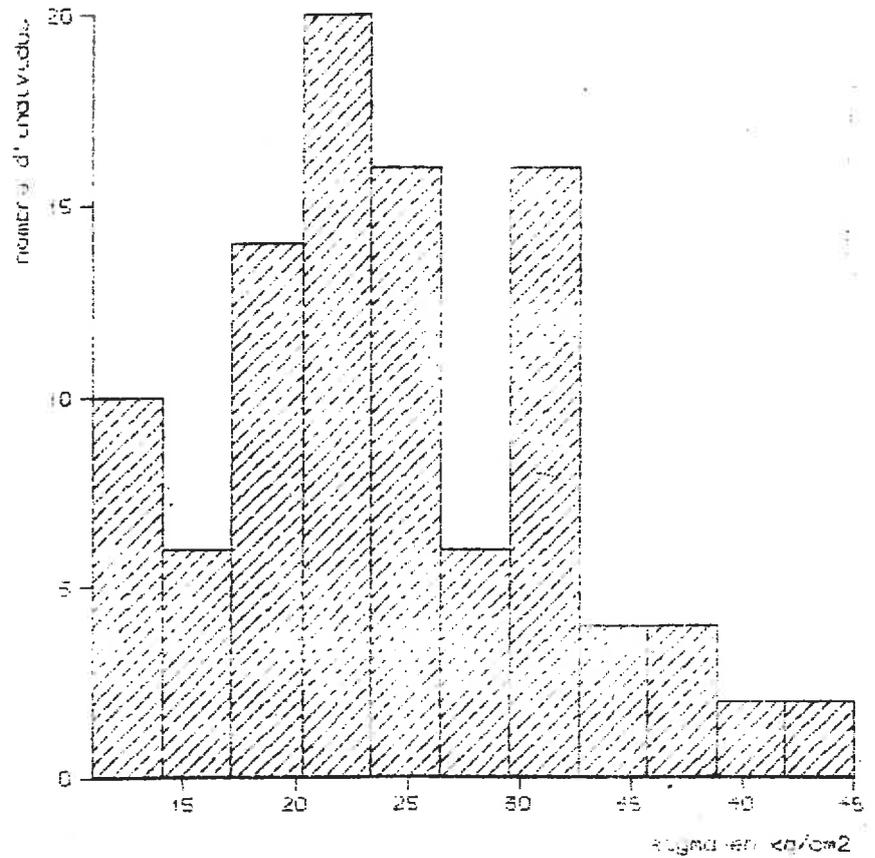


FIGURE 3₃: Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats arrondis BOIGNEVILLE L_O

9 classes
100 individus

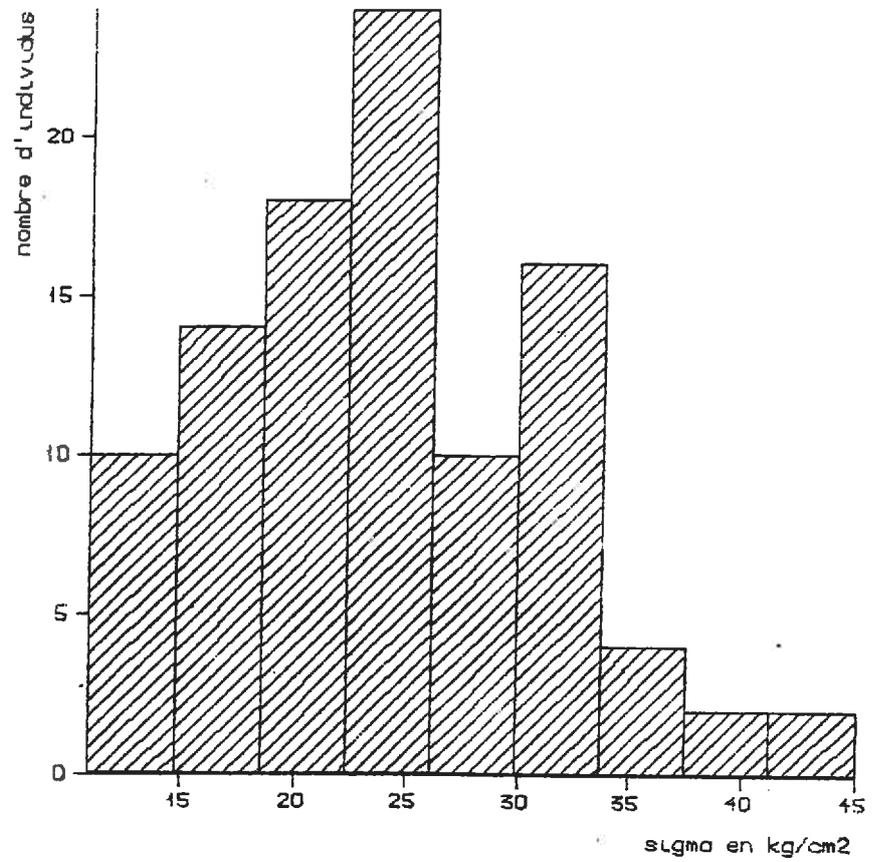
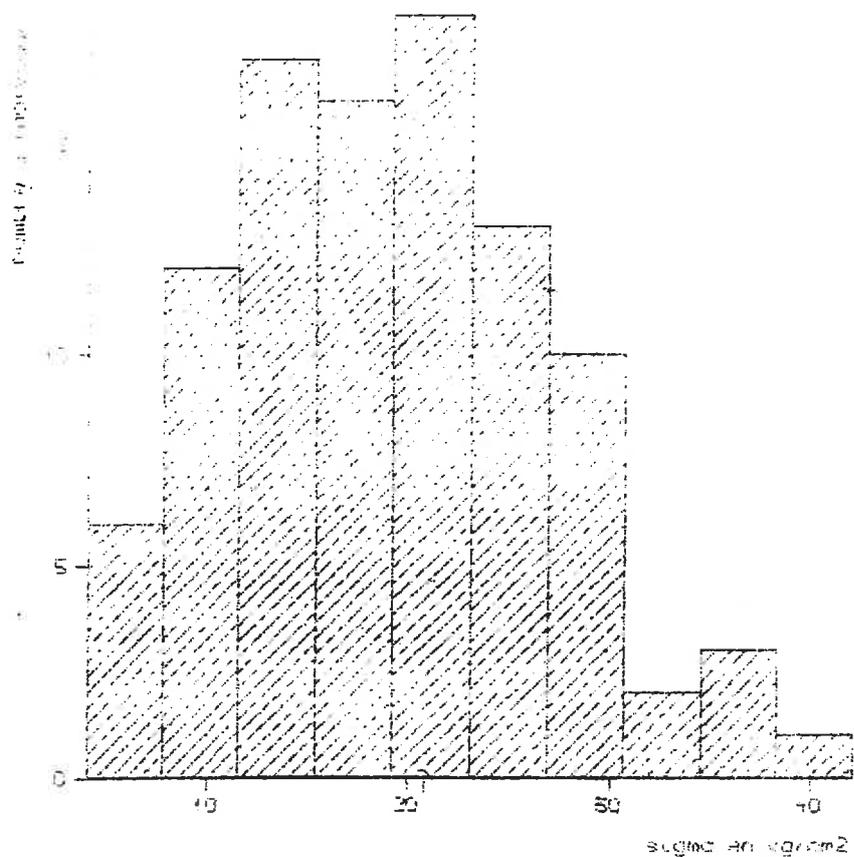


FIGURE 34 (suite) : Histogramme de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats arrondis BOIGNEVILLE L₀

10 classes
98 individus



11 classes
98 individus

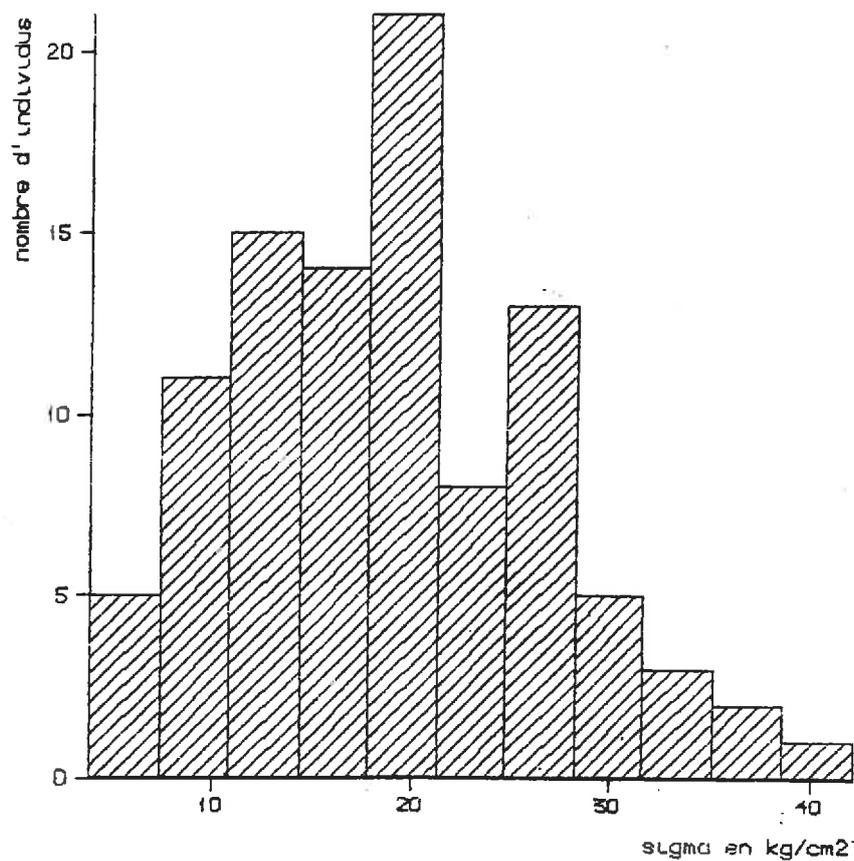


FIGURE 35: Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats non arrondis BOIGNEVILLE L_O

3.4.2 Le calcul de la moyenne et de l'écart-type

Dans l'exemple précédent, nous avons opéré sur un grand nombre d'agrégats (une centaine). Nous devons choisir un nombre d'agrégats c'est-à-dire un nombre de mesures pour avoir une bonne représentativité de la population.

Nous supposerons que les 9 échantillons ont des distributions semblables et considèrerons que les deux variables statistiques moyenne et écart-type caractérisent bien les variations d'une distribution en fonction du nombre d'individus. Nous avons alors opéré comme suit :

Pour des agrégats arrondis : Nous avons porté la variation de la moyenne et de l'écart type de la résistance à l'écrasement en fonction du nombre des mesures pour Boigneville L_2 (agrégats séchés pendant 24h à 105°C).

Pour des agrégats non arrondis : Nous avons opéré de même pour Boigneville L_0 (agrégats séchés pendant 24 heures à 105° C).

La figure 3_g montre une stabilisation de la moyenne dès les 20 ou 30 premières mesures et une stabilisation de l'écart type au-delà de 60 mesures. On évaluera donc la résistance à l'écrasement d'une population d'agrégats avec 60 mesures.

Remarquons que la stabilisation de l'écart-type est plus lente pour Boigneville L_2 (le plus riche en M.O.) que pour les autres. On pourra faire l'hypothèse d'une hétérogénéité inter-agrégats plus forte.

3.5 L'influence de la forme des agrégats sur l'évaluation de la résistance à l'écrasement d'un sol, justification de l'arrondi

Comme nous l'avons vu, la proportionnalité entre la force à l'écrasement d'un agrégat et sa section, laisse supposer une relation entre la surface de rupture et la résistance à l'écrasement. Le problème sera bien d'essayer d'avoir la meilleure estimation possible de cette surface de rupture en contrôlant la forme de l'agrégat.

BOIGNEVILLE L₀ (aggregats non arrondis)

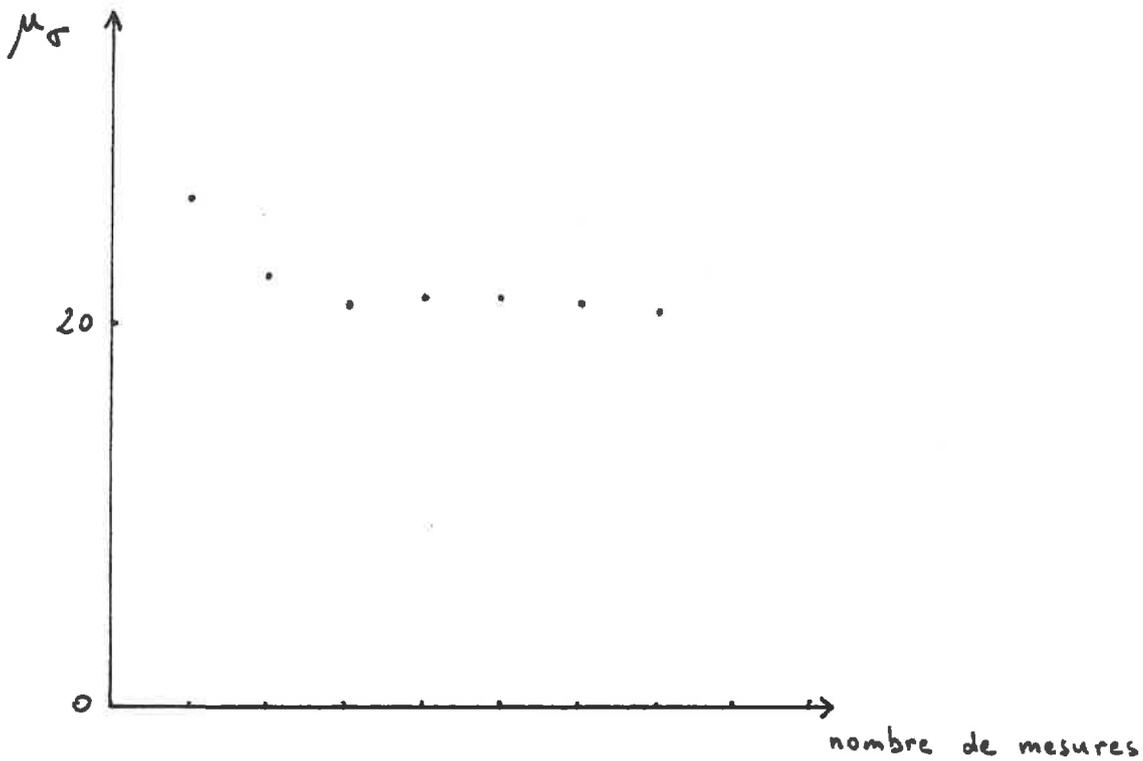
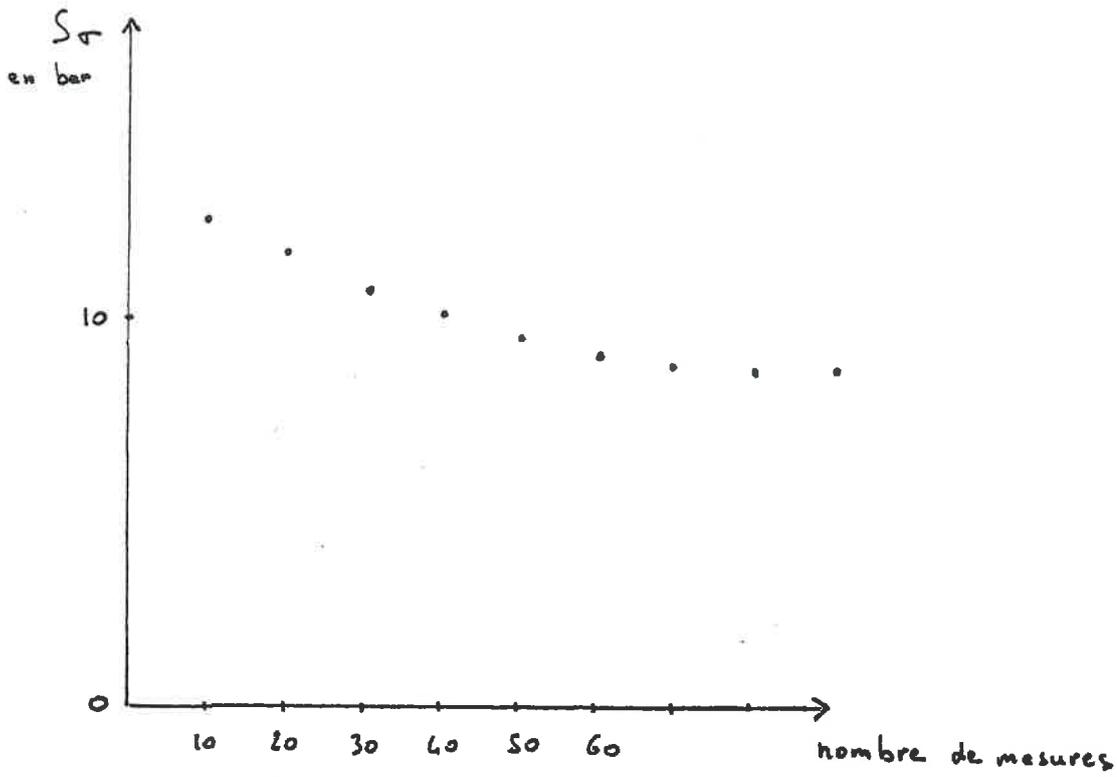


Figure 3g : Variation de la moyenne (μ_σ) et de l'écart type (S_σ) de la résistance à l'écrasement en fonction du nombre de mesures

BOIGNEVILLE L₂ agrégats arrondis

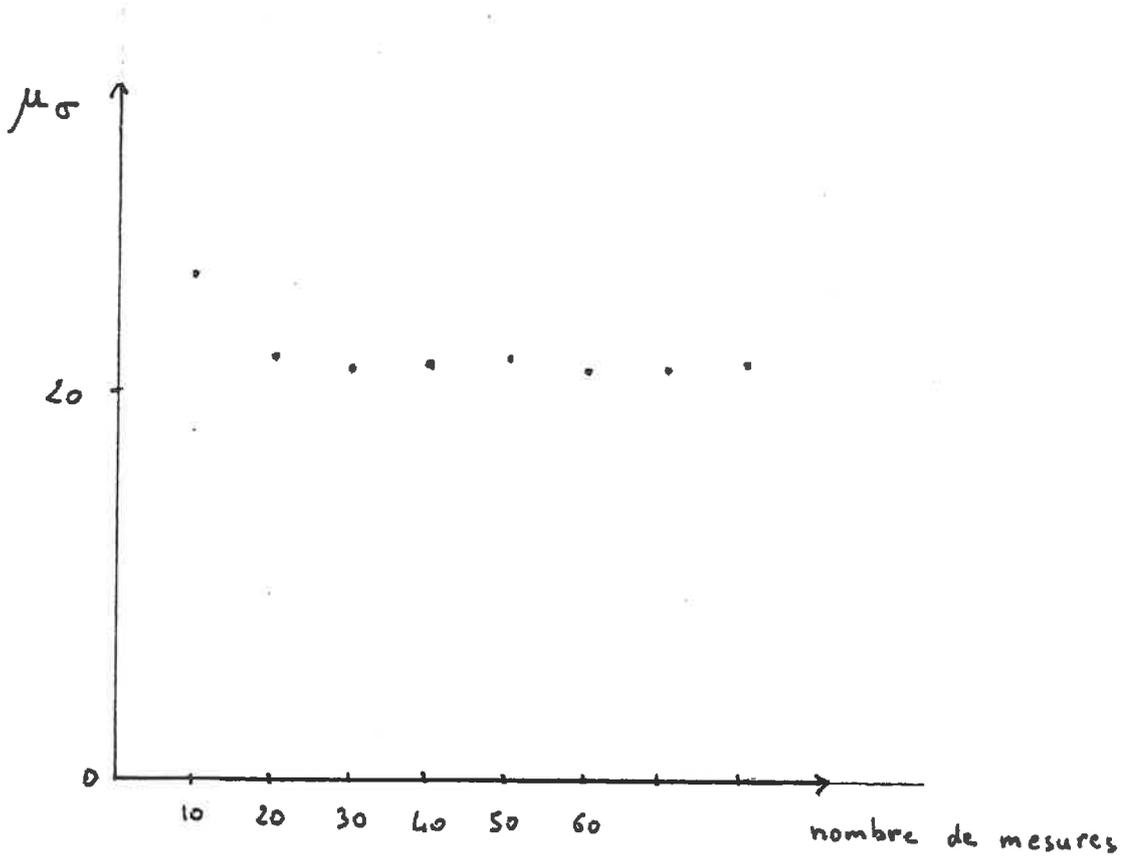
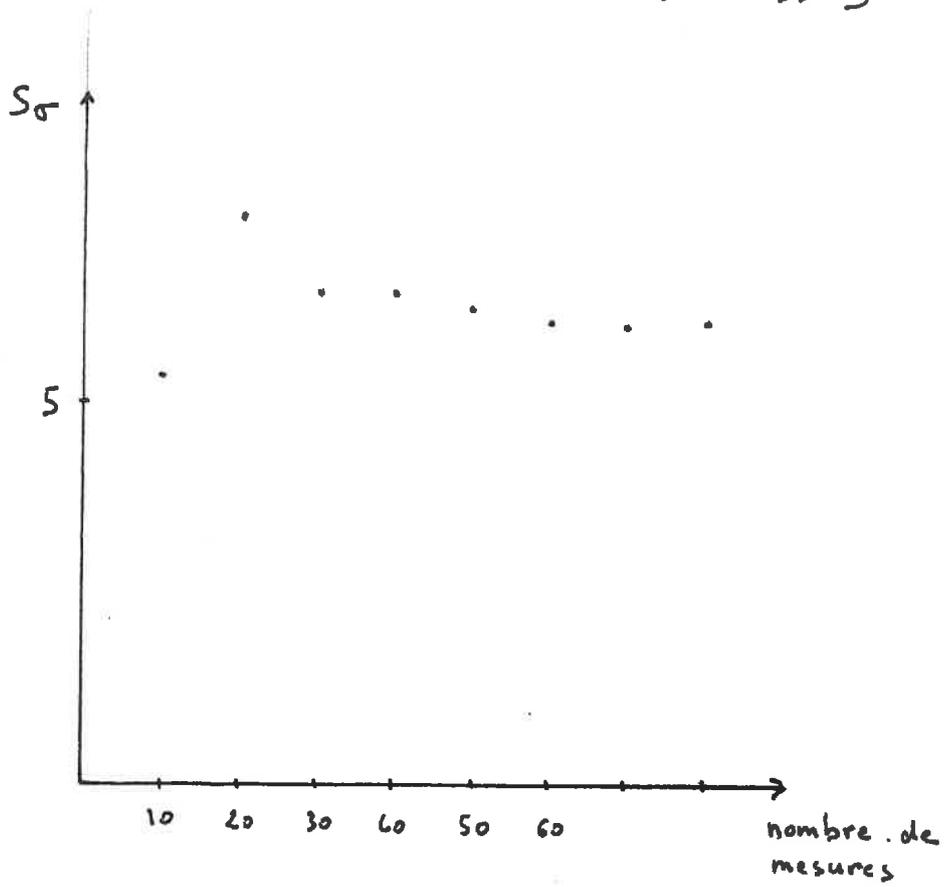


Figure 38 (suite)

3.5.1 Le contrôle de la forme de l'agrégat de 2-3 mm

Pour isoler l'effet forme, nous travaillerons dans ce chapitre sur des agrégats remaniés de façon à éliminer la composante "structure".

On compare la distribution de la résistance à l'écrasement :

- De 60 agrégats arrondis St Paul 40-60
- De 60 agrégats non arrondis St Paul 40-60. Ce sont des agrégats triés suivant un critère de sphéricité : on élimine ainsi les agrégats dont la forme est trop éloignée de celle d'une sphère.

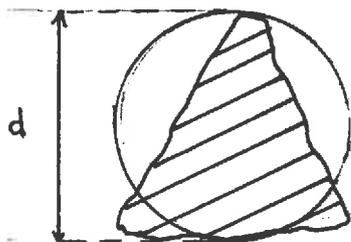
On obtient les deux histogrammes (Figures 3₉ et 3₁₀) et les statistiques suivantes sur les résistances à l'écrasement :

	Nombre de mesures	Moyenne	Ecart Type	CV en %
Arrondis	60	24,6	5,1	20,7
Non arrondis	60 56	21,33 19,66	9,76 7,51	45,8 30,9

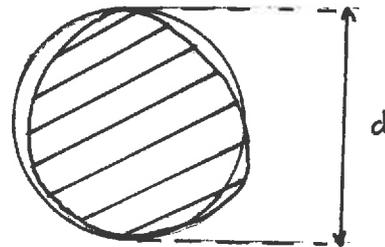
(Les 56 mesures sont obtenues en supprimant les 4 valeurs supérieures à 40 bar)

La dispersion des mesures sur les agrégats non arrondis est supérieure à celles concernant les agrégats arrondis (Cf. Histogrammes Figures 3₉ et 3₁₀).

Cette dispersion provient de la relation entre la force d'écrasement et la surface de rupture (Cf. ci-après) : cette dernière est moins bien estimée sur des agrégats non arrondis que sur des agrégats arrondis (Cf. exemple ci-dessous) :

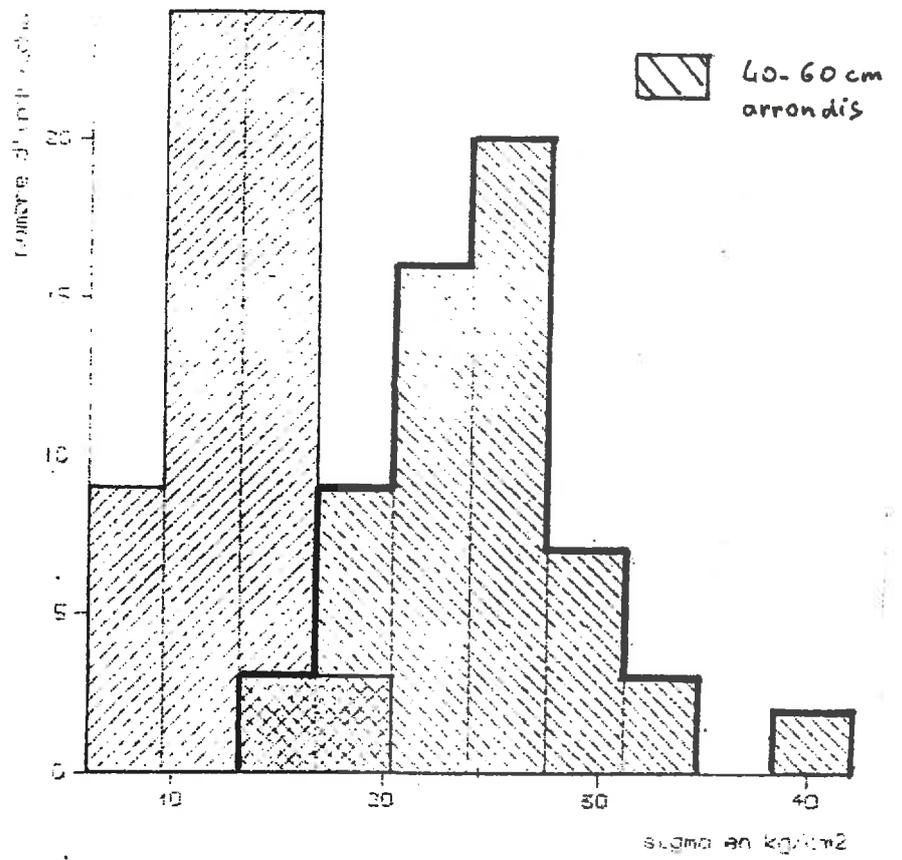


Agrégat non arrondi de forme pyramidale

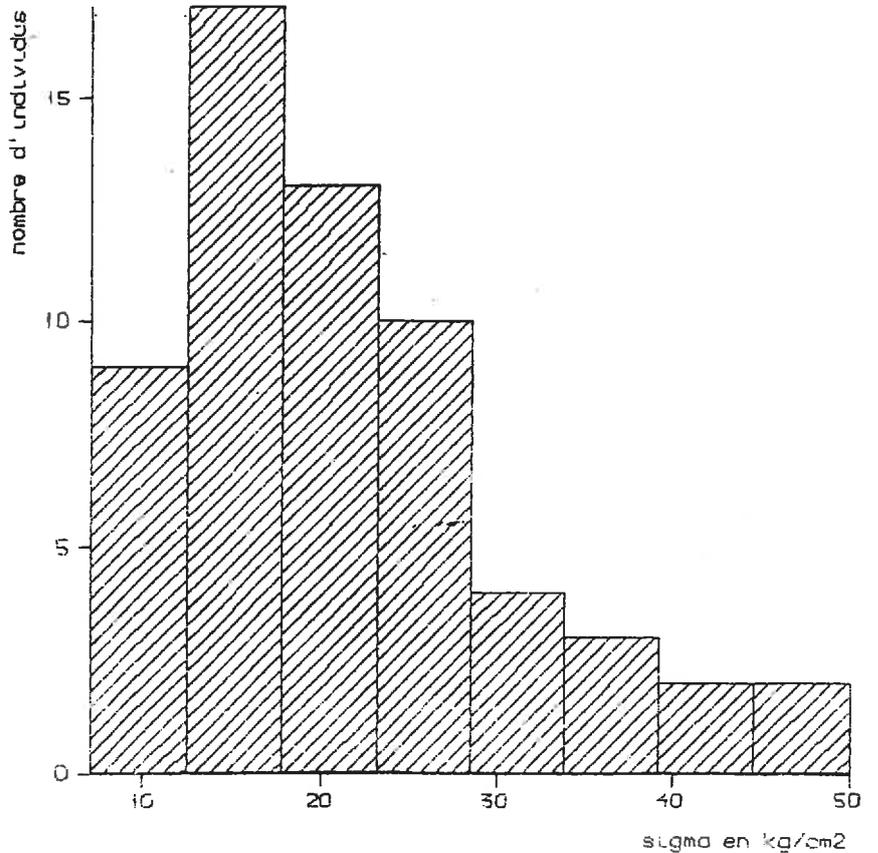


Agrégat arrondi de forme sphérique

Aggregats arrondis
(60 mesures)



Aggregats non arrondis
(60 mesures)



Figures 39 et 310 : Histogrammes de repartition de la résistance à l'écrasement - Comparaison agregat arrondis - agregats non arrondis

Le test de X^2 ne permet pas de conclure sur la normalité de la distribution des résistances à l'écrasement des agrégats arrondis. Néanmoins, cette distribution est unimodale et symétrique. L'interprétation à partir de la moyenne et de l'écart-type en sera donc facilitée. Par contre, la distribution des résistances à l'écrasement d'agrégats non arrondis n'est pas normale (test de X^2 non significatif) et n'est pas symétrique.

La lecture graphique de la force de rupture est beaucoup plus facile (pic unique et bien marqué) quand on opère sur des agrégats arrondis

Quand il s'agit d'agrégats non arrondis, les pics de rupture sont moins nets : il y a souvent plusieurs petits pics qui les précèdent

Les trois points précédents justifient la technique d'arrondi.

Elle introduit néanmoins un biais : si l'on compare les teneurs en carbone des agrégats de 2-3 mm arrondis et non arrondis, on s'aperçoit que : (cf. tableau 3₁)

- Pour les sols les plus riches en matière organique, les agrégats arrondis naturels sont toujours moins riches en carbone libre et lié. Cette technique, permettant d'arrondir les agrégats, élimine les individus ayant une cohésion faible et par ailleurs plus riches en M.O.. Ainsi donc cette préparation des échantillons atténue l'écart de teneur en matière organique, dans un même couple.

- Pour les sols les moins riches en M.O., la teneur en carbone avant et après l'arrondi des agrégats est identique. Ceci montrerait une meilleure homogénéité de la répartition de la M.O. des agrégats de ces sols (ce résultat sera confirmé plus loin). Les agrégats remaniés, arrondis ou non, ont la même teneur en carbone quel que soit le sol. Ils présentent une homogénéité de teneur en carbone pour un même échantillon.

On ne peut pas évaluer l'incidence de l'élimination des agrégats les moins résistants sur l'allure générale des histogrammes de résistance à l'écrasement. L'estimation de la résistance à l'écrasement ne sera donc pas représentative du sol mais d'une sous-population d'agrégats arrondis.

C_T = carbone total
 C_L = carbone libre

	agregats remaniés		agregats naturels				
	arrondis		arrondis		non arrondis		
	C _T	non arrondis	C _T	C _L	C _T	C _L	
Limons	0-20	2,03	2,08	1,04	0,27	1,32	0,39
	20-60	0,57	0,59	0,72	0,14	0,61	0,13
Boigneville	L ₂	2,12	2,2	1,45	0,16	1,95	0,36
	L ₀	0,98	1,03	0,95	0,09	1,04	0,12
ST Paul	0-20	1,41	1,42	1,09	0,12	1,25	0,13
	40-60	0,78	0,78	0,81	0,06	0,79	0,06
Les Vigneres	0-20	2,21	2,25	1,78	0,35	2,14	0,52
	20-40	1,56	1,56	1,28	0,19	1,63	0,31
	40-60	0,68	0,69	0,64	0,04	0,67	0,05

Tableau 31 : Analyse de la teneur en carbone d'agregats arrondis et non arrondis, naturels et remaniés

3.5.2 L'influence de la géométrie de la surface de rupture sur la résistance à l'écrasement

Pour étudier l'incidence de ce facteur, nous avons fabriqué des agrégats artificiels de formes différentes. Pour avoir une bonne estimation de la surface de rupture, on a choisi le plus gros volume possible compatible avec la force maximale admissible par le capteur de force.

Pour cela, des cubes et des parallélépipèdes sont découpés dans des cylindres de matériau remanié St Paul 0-20, puis arrondis mécaniquement pour obtenir 3 sphères et 4 ellipsoïdes de révolution (Cf. Figure 3₁₁). Après séchage pendant 24 heures à l'étuve, on mesure la résistance à l'écrasement. Pour les 7 individus, la rupture a eu lieu 6 fois en 3 morceaux et 1 fois en 4 morceaux. Pour chaque individu, la surface totale de rupture est mesurée à l'analyseur d'images. Le tableau 3₂ résume les résultats. σ_a est calculé avec la formule de la résistance à l'écrasement des agrégats.

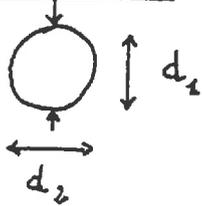
Les résultats varient du simple au double entre les formes sphériques et ellipsoïdales. Par contre, pour ces 2 formes σ_b est homogène et donne une meilleure estimation de la résistance à l'écrasement du matériau St Paul 0-20 remanié.

La forme d'un individu a donc bien une influence sur la résistance à l'écrasement. Un tri visuel des agrégats arrondis permet de ne retenir que les mieux arrondis (Cf. 2.5.2.2) en éliminant les formes les plus allongées et donc de diminuer l'erreur que provoque la forme sur l'estimation de la résistance à l'écrasement. Comme le montre la Figure 3₁₂, l'influence de l'indice d'élongation I mesuré à l'analyseur d'images, pour $I < 1,3$, sur la résistance à l'écrasement d'agrégats de 2-3 mm, arrondis et triés, n'est pas assez forte pour la modifier. Nous avons vérifié que le tri des agrégats arrondis, basé sur des critères subjectifs, nous conduit à retenir des populations telles que $I_{\text{moyen}} < 1,25$ pour les 9 sols (mesures effectuées à l'analyseur d'images).

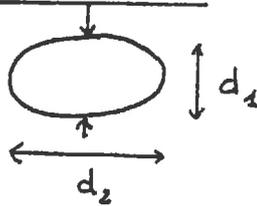
Forme sphérique

Forme ellipsoïdale

application d'une force F



application d'une force F



F = force d'écrasement

d_1 = plus petite dimension

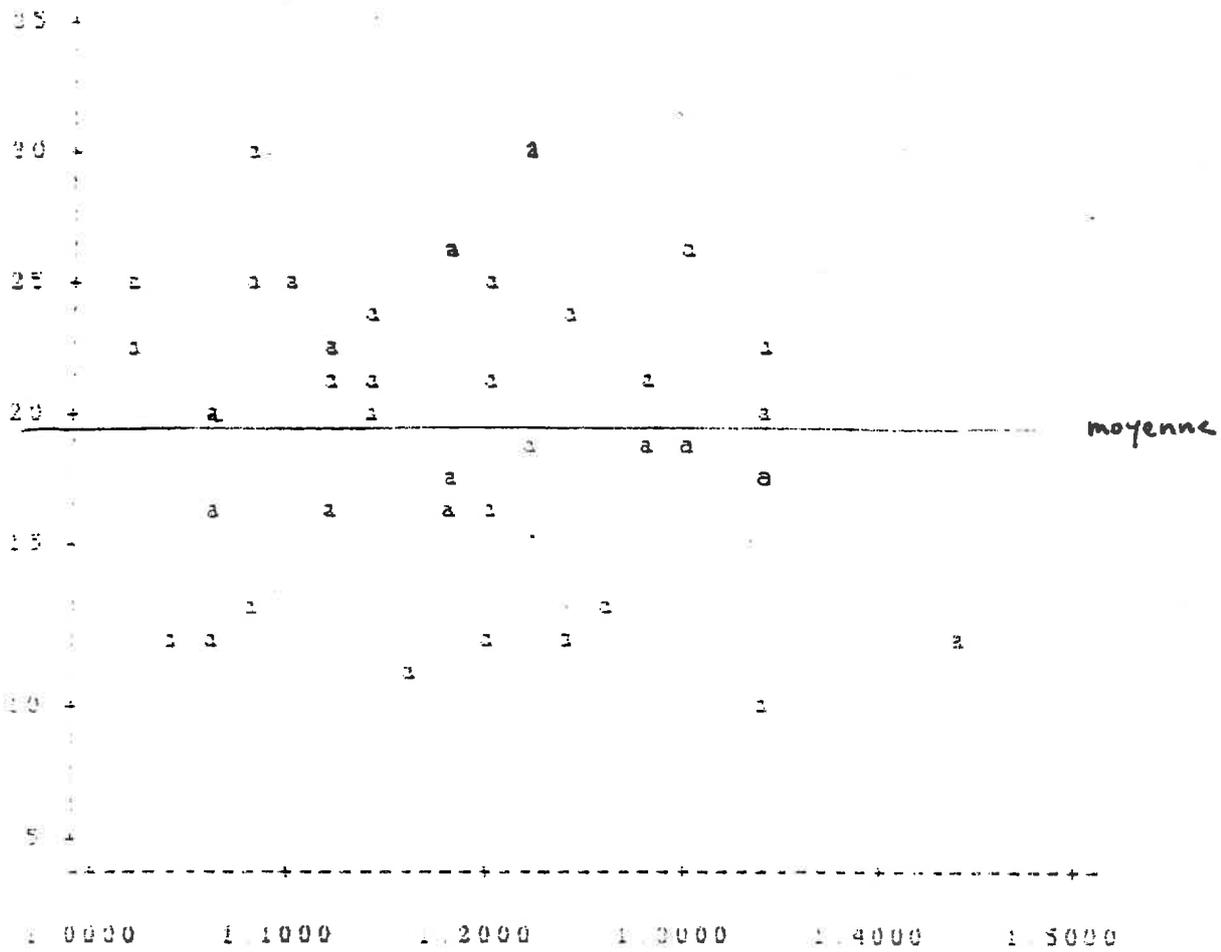
S = surface de rupture

d_2 = plus grande dimension

	d_1 en cm	d_2 en cm	d_1/d_2	F en N	S en cm^2	$\sigma_a = \frac{4F}{\pi d_1^2}$	$\sigma_b = F/S$
Formes	1,44	1,55	1,08	25,9	2,52	18,9	10,28
sphériques	1,1	1,1	1	13,6	1,54	14,3	8,83
	1,1	1,1	1	13,9	1,39	14,6	10
Formes ellipsoïdale	1,24	2,1	1,69	26,8	2,88	7,7	9,28
	1,24	2,1	1,69	25,4	2,80	7,3	10,15
	1,08	1,6	1,48	15	1,58	7,5	9,49
	1,1	1,52	1,38	15,8	1,73	8,7	9,13

Figure 311 et tableau 32 : Influence de la forme sur la résistance à l'écrasement (σ)

sigma



indice d'elongation = $\frac{d_{max}}{d_{min}}$

Figure 312 : Influence de l'indice d'elongation sur la resistance à l'écrasement (sigma)

4. RESULTATS

4.1 Densité d'agrégats secs

4.1.1 Choix des agrégats

Après avoir arrondi les agrégats des Limons Fond, nous avons remarqué deux types d'agrégats arrondis :

- Certains de couleur claire, présentant une surface lisse (Type "L"),
- D'autres de couleur plus foncée présentant une surface rugueuse (type "R").

Le type "L" représente 1/3 de la population d'agrégats arrondis mais seulement quelques pour cent de la population d'agrégats non arrondis. Ces agrégats ont été sélectionnés lors de l'arrondi parce que leur cohésion est plus forte (résistance à l'écrasement moyenne de 10,7 bars pour 60 individus). Nous ne travaillerons donc que sur les agrégats de type "R".

4.1.2 Influence de la teneur en carbone

Nous avons porté pour des agrégats de 2-3 mm naturels et remaniés arrondis et non arrondis $\rho = f(C_T)$ (18 valeurs)
 ρ_{i-1} et C_{Ti} étant respectivement les différences de densité et de teneur en carbone total des agrégats du couple i.

Comme le confirme le graphique (Figure 4₁), pour un couple de sol i, nous avons toujours $\rho_{M.O.i} < \rho_i$
avec $\rho_{M.O.}$ et ρ les densités respectives des échantillons riches et pauvres en M.O. (le Tableau 4₁ nous montre que la différence $\rho_{M.O.i} - \rho_i$ n'est pas seulement due à une variation de la densité de solide mais que la M.O. induit bien une porosité supplémentaire).

Remarquons que, pour les agrégats naturels arrondis des Vignères,
 $\rho_{0-20} = \rho_{20-40} = 1,96$
alors que l'échantillon 0-20 est plus riche en carbone total (1,78 %) que l'échantillon 20-40 (1,28 %).

Influence de CT sur ρ

v Vignères

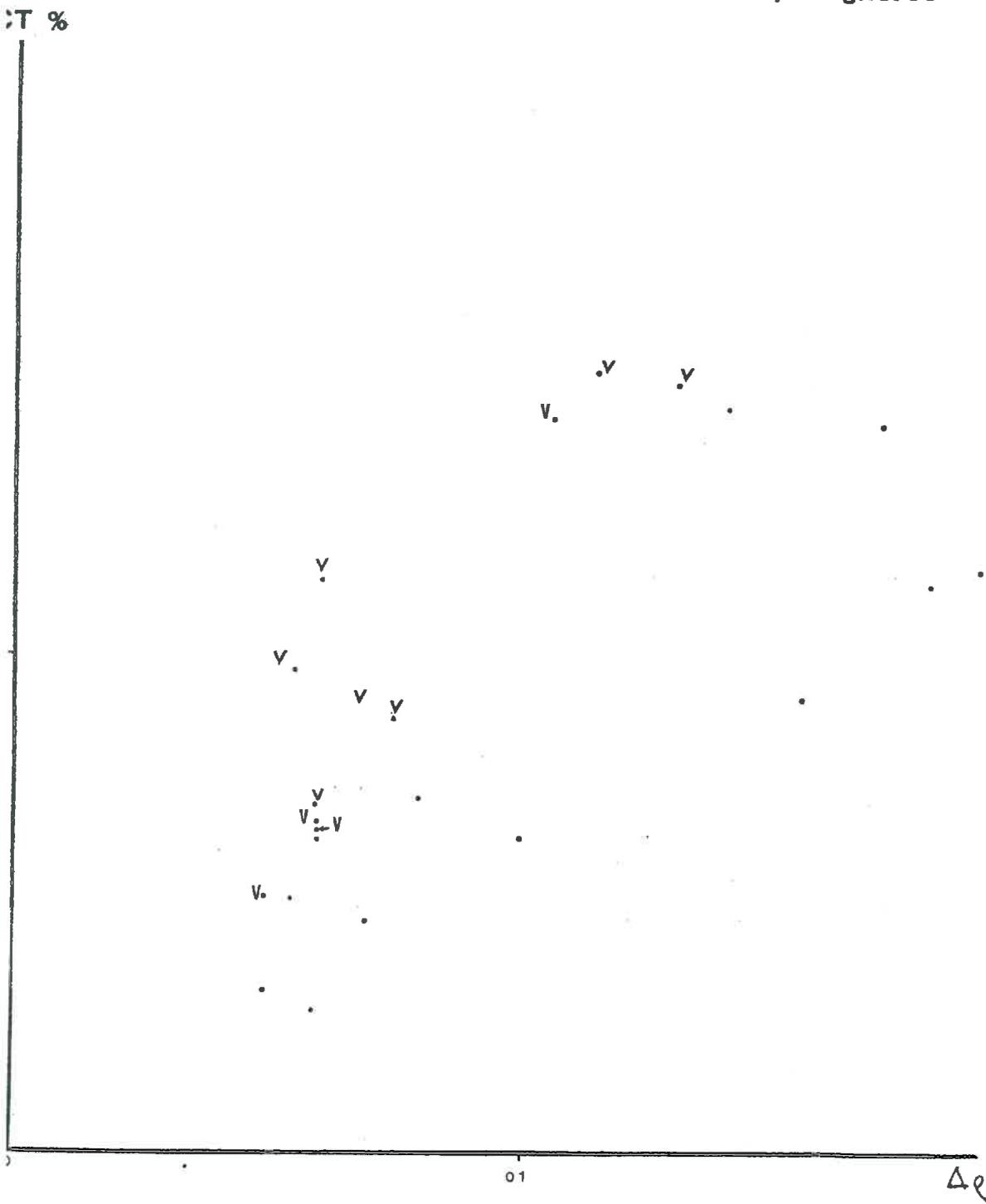


Figure 41

	ρ_s	ρ_d	$\Delta \rho_s$	$\Delta \rho_d$
Limons 0-20	2,68	1,73	0,02	0,08
	2,70	1,81		
Boigneville L ₂	2,61	1,70	0,03	0,15
	2,64	1,86		
ST Paul 0-20	2,66	1,81	0,03	0,07
	2,69	1,88		
Les Vignerons 0-20	2,62	1,88	0,02	0,05
	2,64	1,93		
	2,65	1,98		

Tableau 41 : Influence de la P.O. sur la densité d'agrégats non arrondis (ρ_d)
 Comparaison avec la densité de solide (ρ_s)

D'autre part, la Figure 4₁ semble montrer que, pour un même C_T , un sol très argileux comme les Vignères présente un $\Delta\rho$ inférieur par rapport aux autres couples de sol. Il y aurait probablement un effet de la teneur en argile sur la variation de densité liée à la M.O..

La densité est une variable trop globale qui n'apporte aucune information sur la morphologie de l'espace poral. Pour mieux comprendre l'origine des variations de cet espace poral et ses conséquences, la distribution dimensionnelle des pores obtenue par porosimétrie à mercure constitue un complément utile (FIES, 1984).

4.1.3 Les résultats de la porosimétrie à mercure sur les agrégats arrondis

Interprétation générale des courbes

L'espace poral textural d'un sol a été modélisé en distinguant (FIES 1984).

- Un espace poral lacunaire lié au retrait de la phase argileuse entre les particules du squelette,
- Un espace poral propre à la phase argileuse.

La porosimétrie à mercure va nous permettre de quantifier ces deux types de pores dans nos agrégats. Elle mesure en effet une quantité de mercure qui a pénétré, dans un volume de pore de diamètre d'entrée équivalent à la pression exercée (loi de Jurin).

Les courbes de porosimétrie présentent deux parties (Cf. Figure et Annexe 4) :

- Un premier plateau correspond à l'entrée de mercure dans l'espace inter-agrégats.
- L'augmentation de la pente de la courbe à partir du premier plateau correspond à l'entrée de mercure dans l'espace poral des agrégats.

FIES (1984) a d'abord montré que, dans des mélanges argile squelette :

- L'espace poral lacunaire correspond à la quantité de mercure intrudé dans l'échantillon jusqu'à des pressions qui correspondent à l'entrée dans des pores de $0,05 \mu\text{m}$.

- La quantité de mercure qui a pénétré dans l'échantillon à des pressions supérieures est représentative de l'espace poral de la phase argileuse.

Puis cette technique a été généralisée à des agrégats naturels de 2-3 mm.

Les résultats sur des agrégats naturels arrondis 2-3 mm

Nous avons donc, pour nos neuf échantillons, obtenu les courbes de porosimétrie (Cf. Annexe 4). Nous avons résumé les résultats dans le tableau ⁴².

- Pour tous les sols (sauf les Vignères 40-60), le volume poral de la phase argileuse ($\phi < 0,05 \mu\text{m}$) ne semble pas modifié de façon significative par la M.O. entre les deux échantillons riches et pauvres en M.O..

- Pour Boigneville et St Paul, la M.O. augmente, au sein d'un même couple, le volume poral lacunaire lié au squelette ($\phi > 0,05 \mu\text{m}$). Par contre, les agrégats des Limons 0-20 et 20-40 ont un espace poral "lacunaire" (lié au squelette) peu influencé par une variation de teneur en M.O.. Avec l'égalité de volume poral lié à la phase argileuse, ceci explique l'égalité des densités entre les Vignères 0-20 et 20-40.

4.2 Relation potentiel teneur en eau

Les courbes $\log \Psi = f(W\%)$ nous suggèrent les points suivants (Cf. Annexe 5 et Fig. 42)

- La rétention d'eau à un potentiel donné augmente avec la teneur en M.O. pour nos 4 sols.

Hygrogats 2-3 mm arrondis naturels

	A en %	G _T en %	G _L en %	ρ _d	Volume de Hg intrudé en cm ³ /100g	
					dans pores < 0,05 μm	dans pores > 0,05 μm
Limons 0-20	13,8	1,94	0,27	1,79	2	15
20-60	10,5	0,72	0,14	1,84	1,8	14,6
Boigne ville L ₂	26,7	1,45	0,16	1,81	2,2	12,7
L ₀	24,4	0,95	0,09	1,88	1,9	11,5
St Paul 0-20	30,1	1,07	0,12	1,83	2,4	13,4
40-60	30,3	0,81	0,06	1,89	2,8	11,6
Les Vigneres 0-20	45,8	1,78	0,35	1,96	3,9	7,3
20-40	45,9	1,28	0,19	1,96	3,8	7,7
40-60	45,6	0,64	0,04	2,02	4,4	5
					erreur ± 0,2 cm ³	

Tableau 43 Mesures de porosimétrie à Mercure

Courbe de Potentiel

BOIGNEVILLE

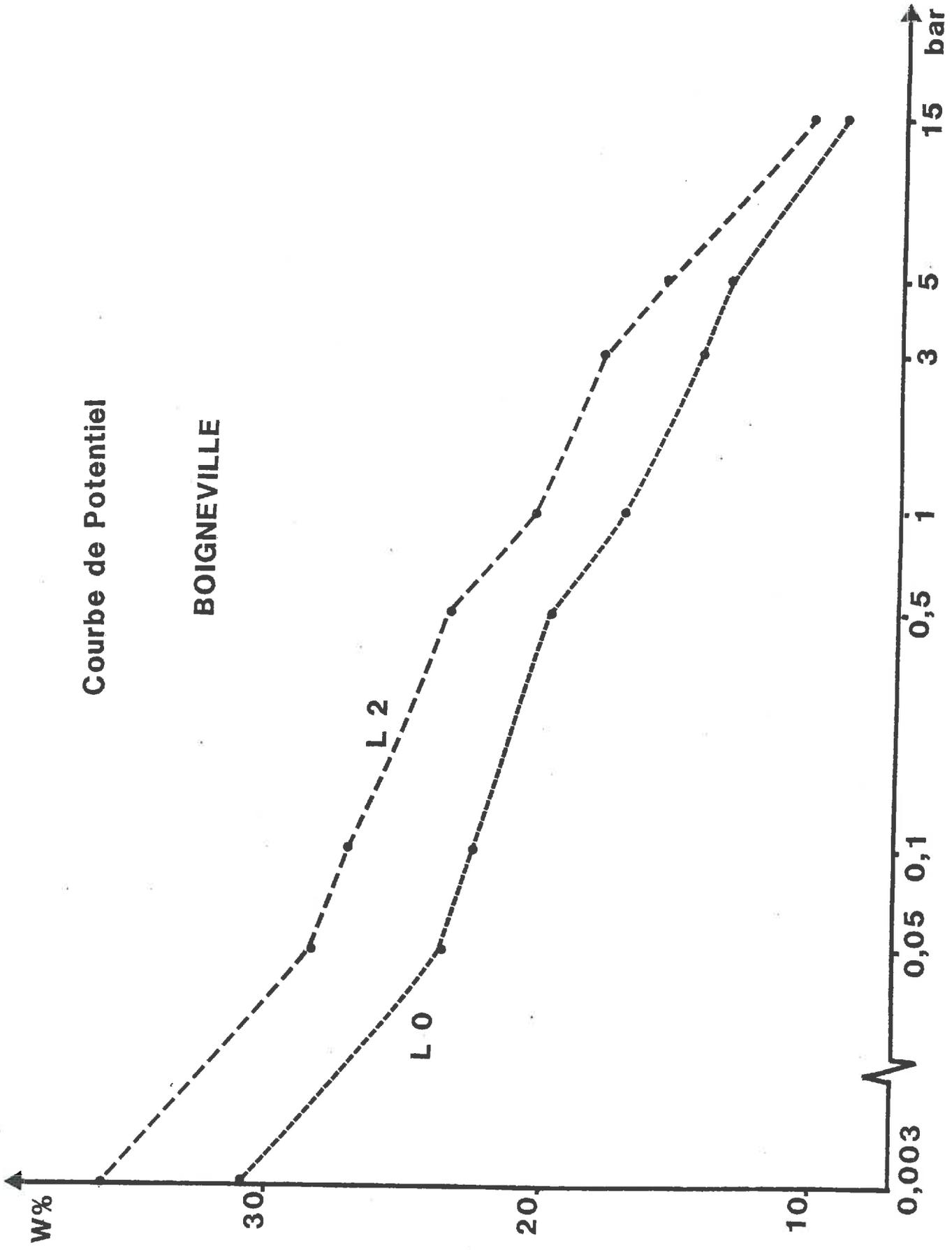


Figure 42

	R.U. de l'échantillon pauvre en N.O. (en % massique)	Augmentation de la R.U. due à la N.O. (en % massique)
Limon	8,8	-0,2
Boigneville	7,7	2,1
ST Paul	7	2,6
Les Vignerres	6,5	2,9

D'après CHATAYOU (1975) la R.U. est calculée comme :

$W_1 - W_{15}$ pour les Limons et Boigneville

$W_{0,5} - W_{15}$ pour ST Paul et les Vignerres

Tableau 43 Influence de la N.O. sur la R.U. des 4 sols

- L'effet de la M.O. sur la rétention d'eau est plus marqué aux faibles suctions qu'aux fortes suctions (ceci confirme les résultats de HAMBLIN, 1977). Aux faibles suctions (entre - 0,5 et - 0,003 bars), les courbes sont à peu près parallèles alors qu'elles convergent aux fortes suctions. Cette convergence est d'autant plus marquée que le teneur en argile est élevée.

- Le Tableau 43 nous montre l'influence de la M.O. des 30 premiers centimètres du sol sur la R.U.. La M.O. augmente le R.U. d'environ 10 % pour les 3 sols les plus argileux (Pour les Limons, cette variation est nulle).

Pour nos trois sols les plus riches en argile, la phase argileuse reste saturée jusqu'à des suctions supérieures à 15 bars (20 bars pour Boigneville et St Paul Cf. ci-après). La convergence des courbes pour des potentiels voisins de -15 bars nous montre que les propriétés rétention de la phase argileuse sont peu modifiées par la M.O. lors de son propre retrait. Ceci complète les résultats de porosimétrie à mercure qui suggèrent que l'organisation de l'argile à l'état sec n'est pas modifiée par la M.O..

4.3 Retrait-gonflement

4.3.1 Rappels bibliographiques

Les caractéristiques de la courbe

HAINES (1923) distingue 3 domaines différents sur une courbe de retrait :

- Une partie linéaire, la droite de saturation : une diminution de volume de l'échantillon correspond au volume d'eau perdue. Sa borne inférieure est appelée point d'entrée d'air.

- Une partie intermédiaire, le retrait résiduel pour lequel il y a entrée d'air dans le matériau. Sa borne inférieure est appelée limite de retrait.

- Une partie où le volume de l'échantillon reste constant.

Les différents types de courbe suivant la nature du sol

STENGEL (1981) distingue 3 types de courbes suivant la teneur en argile dans un mélange artificiel argile-limon

$A < 15\%$ Il n'y a pas de retrait résiduel. On a une bidroite avec retrait le long de la droite de saturation.

$15\% < A < 60\%$ On obtient une tridroite dont l'amplitude de retrait résiduel diminue quand la teneur en argile augmente.

$60\% < A$ Les courbes sont semblables à celles de l'argile pure : il n'y a pas de limite de retrait.

PINOCHET (1981) retrouve des résultats analogues sur des sols naturels.

Essai de modélisation

Il est difficile de définir un modèle de prédiction du gonflement-retrait d'un sol. Néanmoins, STENGEL (1981) montre que la limite de retrait d'un mélange argile-limon correspond au point d'entrée d'air de l'argile pure. PINOCHET (1981) n'a pu ni confirmer, ni infirmer ceci sur des sols naturels. Le point d'entrée d'air de l'argile correspond à une discontinuité de ses propriétés mécaniques et en particulier à une augmentation de sa résistance à la compression simple (KEZDI, 1974).

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Les courbes de gonflement-retrait

Nous avons rassemblé les courbes de gonflement-retrait de nos 9 échantillons de sol dans l'Annexe 6. Elles nous suggèrent les résultats suivant : A humidité constante, la M.O. diminue la densité des agrégats. Cette diminution est surtout sensible pour des humidités inférieures à l'humidité du point d'entrée d'air.

Nous avons déterminé, pour chacun des 9 échantillons de sol, l'humidité au point d'entrée d'air (W_{AE}) et d'humidité à la limite de retrait (W_{LR}). Ces points correspondent théoriquement à une discontinuité de pente. Néanmoins,

		Densité seche	Point d'entree d'air (A.E.)		Limite de retrait (L.R.)		
		ρ_d	W_{AE}	ψ_{AE} en bar	W_{LR}	ψ_{LR} en bar	G_p
Limon	0-20	1,73	22,5	0,11	11	4,8	0,197
	20-60	1,81	20	0,07	10	4	0,147
Boigneville	L ₂	1,70	28	0,06	9	21	0,269
	L ₀	1,86	23	0,07	8-9	21-16	0,264
St Paul	0-20	1,81	18,5	1,5	11	18	0,231
	40-60	1,88	16,5	1,7	11	20	0,221
Les Vignerres	0-20	1,88	22	2	10	10	0,435
	20-40	1,93	19	6,5	?	?	0,412
	40-60	1,98	18	13	?	?	0,433

Tableau 4.4 Points particuliers de la courbe gonflement-retrait et Gonflement potentiel (G_p)

comme ils correspondent aussi à des valeurs où la dispersion des mesures est plus forte, la précision obtenue sur leur détermination est faible. Comme nous comparons deux valeurs d'un même couple, le problème se situe surtout dans la reproductibilité du critère de détermination de ces points de l'échantillon "avec M.O." à l'échantillon "sans M.O.". Les résultats obtenus sur nos courbes (Cf. Annexe 6 courbes de gonflement-retrait) sont reportés dans le Tableau 44

- Pour nos 4 sols, l'humidité au point d'entrée d'air varie avec la teneur en M.O.. Cette dernière a tendance à augmenter W_{AE} .

- Pour nos 3 sols les moins argileux (Limon, Boigneville et St Paul), l'humidité à la limite de retrait ne semble pas beaucoup varier avec la teneur en M.O.. Dans le cas du sol le plus argileux (Vignères), nous n'avons pas assez de points pour définir W_{LR} .

4.3.2.2 Influence sur le gonflement potentiel

Il est défini comme la variation relative de volume entre l'état sec et l'état humide.

Nous prendrons la variable :

$$G_p = \frac{\text{volume humide à } 0,003 \text{ bar} - \text{volume à } 105^\circ \text{ C}}{\text{volume sec à } 105^\circ \text{ C}}$$

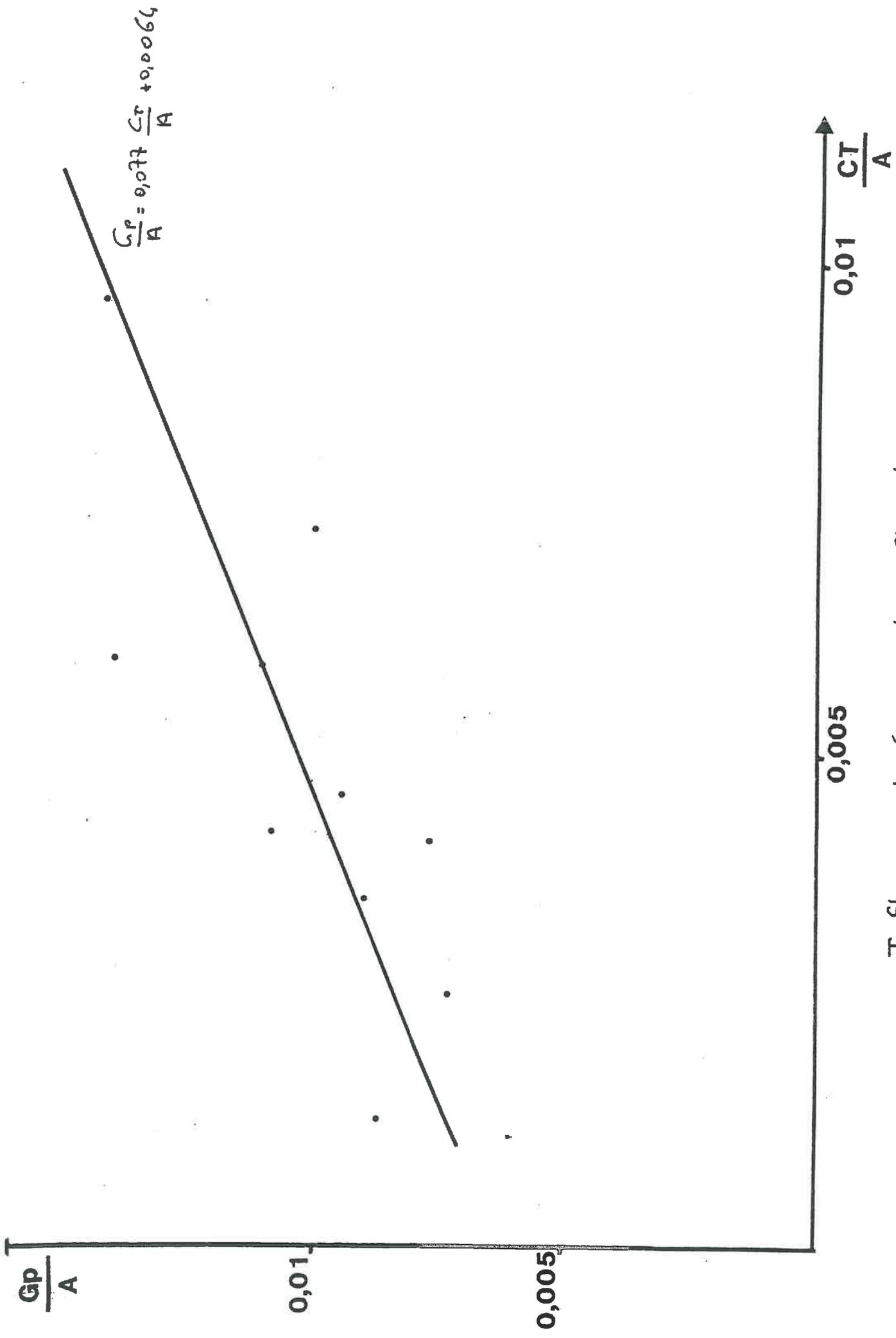
choisie par PINOCHET (1981) comme indicateur de l'activité structurale d'un sol c'est-à-dire son aptitude à se fragmenter sous les alternances humectation dessiccation.

Nous avons calculé G_p pour nos 9 sols (Cf. Tableau 44) et avons essayé de modéliser l'influence de la M.O. sur G_p en calculant

$$\frac{G_p}{A} = f\left(\frac{C}{A}\right)$$

Il semble en effet d'après PINOCHET, 1981, que le gonflement potentiel soit une fonction linéaire de la teneur en argile puisqu'il a trouvé sur 17 sols :

$$G_p = 0,0085 A + 0,0224$$



Influence de C_T sur le gonflement potentiel

Nous avons trouvé pour 9 mesures (sur des agrégats naturels 2-3 mm non arrondis).

$$\frac{G_P}{A} = 0,077 \frac{C_T}{A} + 0,0064 \quad (\text{où } G_P = 0,077 C_T + 0,0064 A)$$

$r = 0,75$ significatif à 5 %

Cette régression montre l'influence importante de la M.O. sur le gonflement potentiel puisque 1 % de C_T correspond à environ 10 % d'argile (nous retrouvons un coefficient de 0,0064 pour l'argile ce qui est peu différent du 0,0085 trouvé par PINOCHET).

Notre régression ne comporte que 9 mesures ce qui est faible. Nous voyons d'ailleurs que le limon 0-20 cm ($\frac{C_T}{A} = 0,95$) est en grande partie responsable de l'extension du nuage. Un plus grand nombre de mesures s'avèreraient nécessaire pour tester l'influence de la M.O.

4.3.2.3 Relation avec le potentiel de l'eau

Nous avons tracé les courbes $1/\rho_d = f(\log \Psi)$ (Ψ succion en bar ; ρ_d masse volumique sèche). Pour chaque humidité, la valeur du potentiel nous a été donnée par les courbes de potentiel. Nous nous sommes limités à des potentiels variant de 0,05 à 15 bar. Les résultats sont les suivants : (cf Fig 43 à 46)

Résultats généraux :

- Pour tous les potentiels mesurés entre 0,05 et 15 bar, la M.O. diminue la densité à un potentiel donné
- Nous avons calculé les potentiels au point d'entrée d'air (Ψ_{AE}) et à la limite de retrait (Ψ_{LR}). Nous les avons portés sur le tableau 44. Pour Boigneville et St Paul, Ψ_{LR} a été calculé en extrapolant les courbes de potentiel. Il apparaît que :

Ψ_{AE} est identique pour les deux échantillons d'un même couple. Sa valeur ne dépend donc pas de la teneur en M.O.. Ce résultat ne se vérifie pas pour les Vignères. Nous ne pouvons pas, a priori, le justifier. Des mesures sur un plus grand nombre d'échantillons seraient nécessaires pour conclure.

La limite de retrait Ψ_{LR} semble aussi ne pas varier pour chaque couple.

Gonflement - Retrait $f(\psi)$

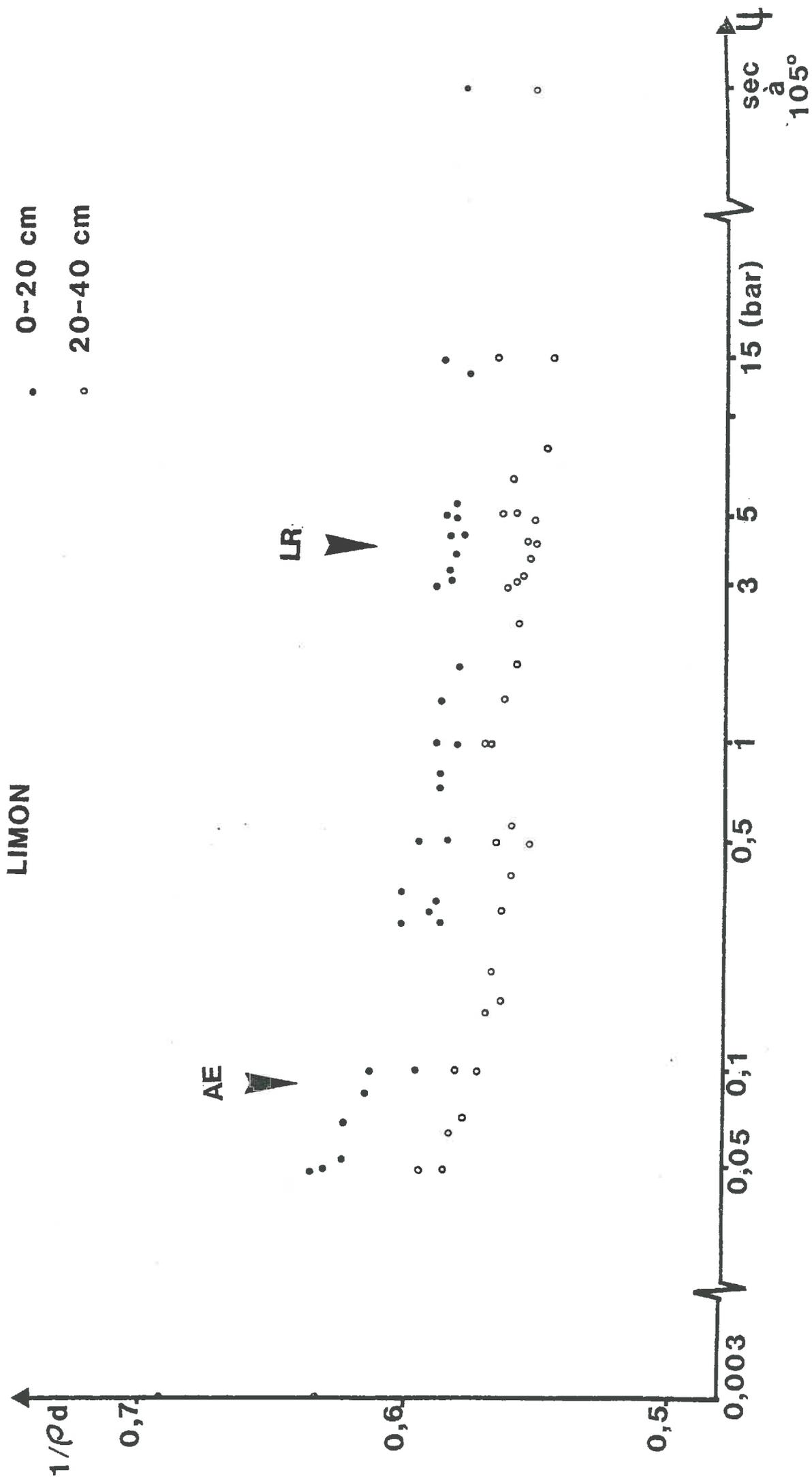


Figure 43

Gonflement - Retrait $f(\psi)$

BOIGNEVILLE

AE

• L 2



○ L 0

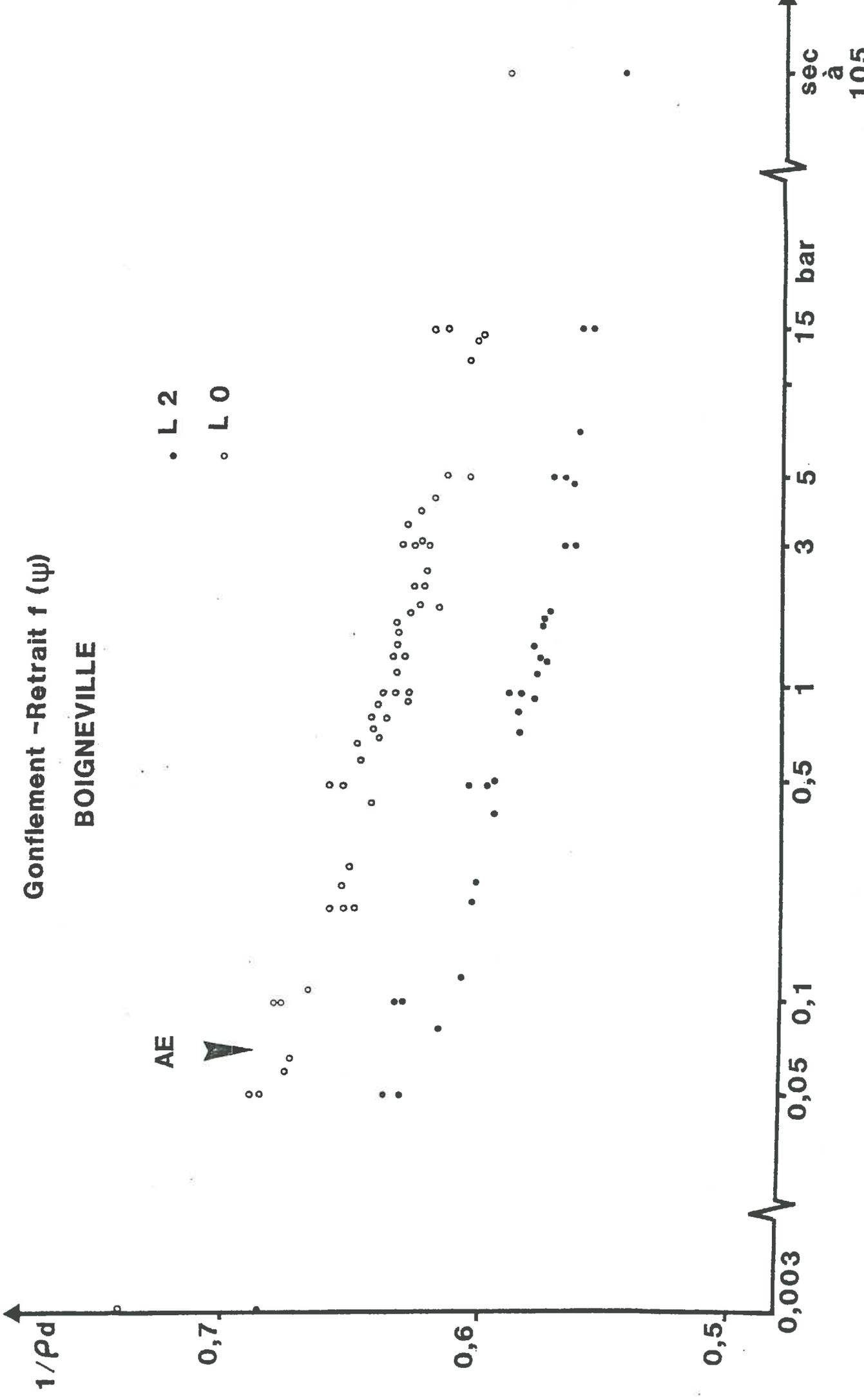


Figure 64

Gonflement - Retrait $f(\psi)$

St. PAUL

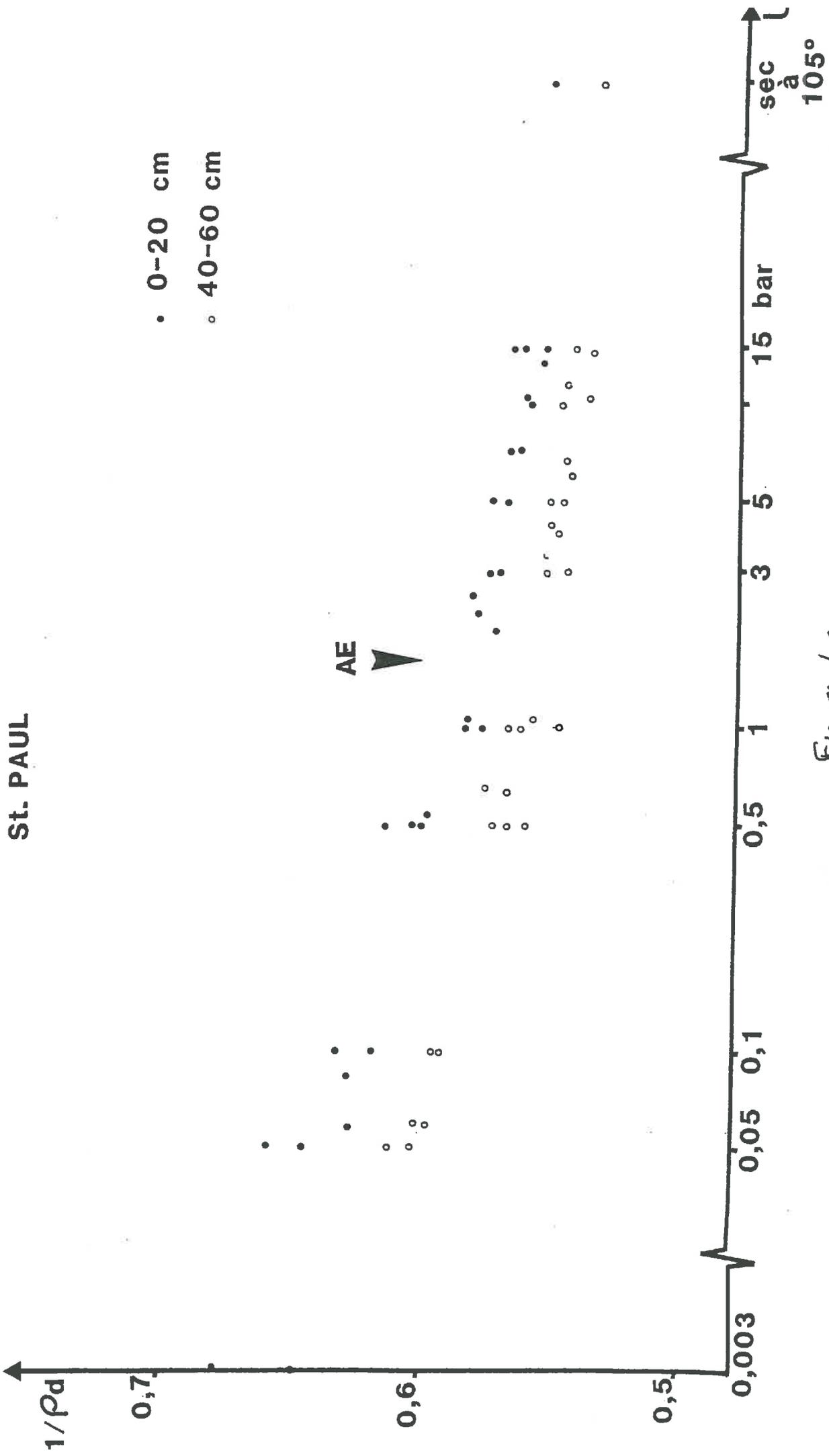


Figure 65

Gonflement -Retrait $f(\psi)$

LES VIGNERES

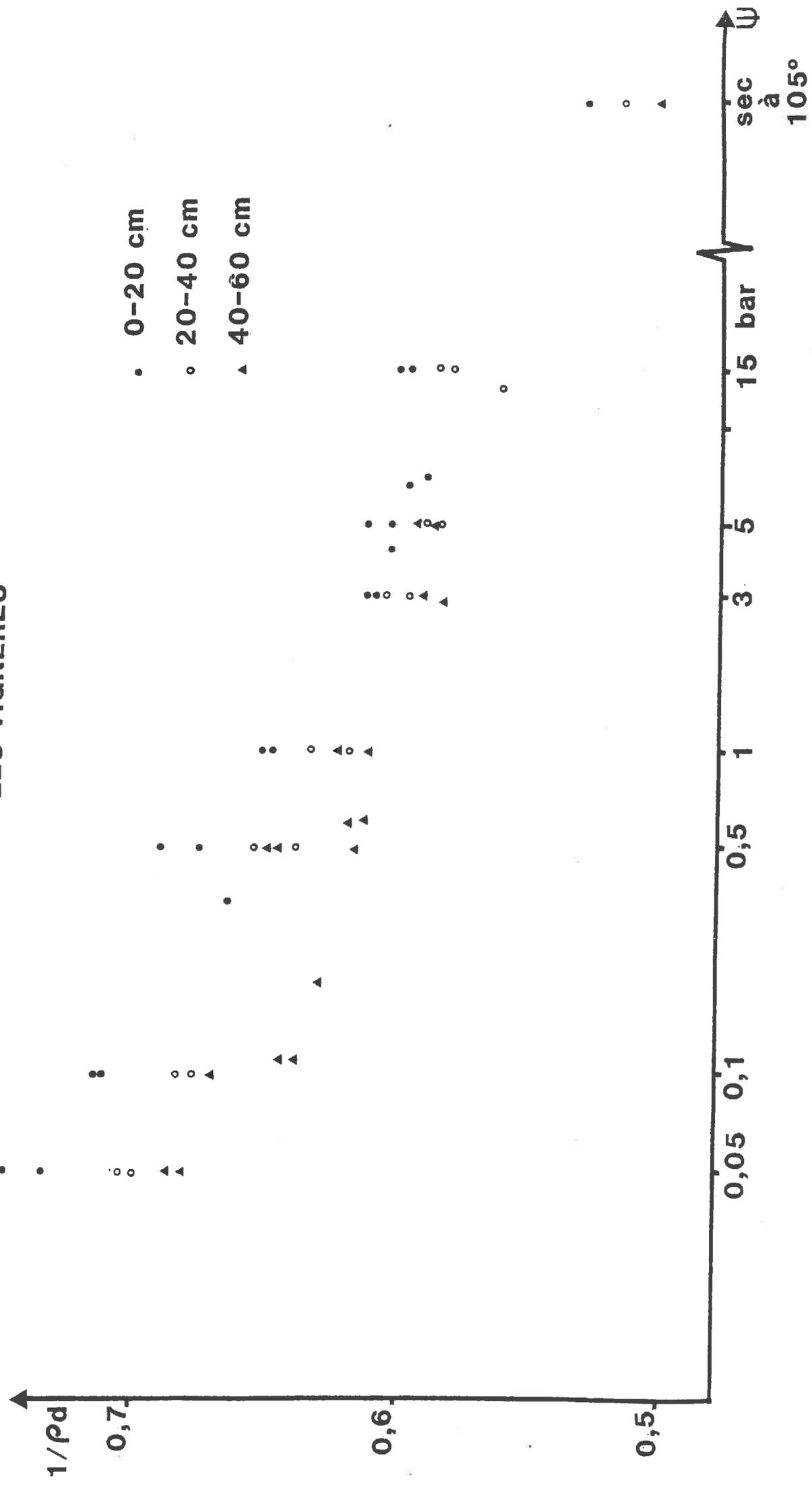


Figure 46

Les résultats dans le domaine saturé

Nous ramènerons, dans ce domaine, les points mesurés sur la droite de saturation en négligeant les écarts expérimentaux. Les écarts par rapport à cette droite sont dûs en particulier :

- une mauvaise estimation du volume des agrégats saturés liée à la technique de mesure
- à une microfissuration des agrégats (qui a lieu principalement pour les sols argileux et est surtout visible sur St Paul).

Pour nos deux sols à teneur en argile intermédiaire (Boigneville et St Paul), les courbes de potentiel restent pratiquement parallèles dans le domaine saturé (pour $\Psi > \Psi_{AE}$). Si l'on trace les droites de saturation de la courbe $1/\rho_d = f(W \%)$ en fonction du potentiel, on obtiendra donc deux courbes équidistantes. Ceci signifie que, dans le domaine saturé, une variation de potentiel induit une même variation de teneur en eau sur deux échantillons d'un même sol avec et sans M.O..

Le cas des limons est différent puisqu'on a effectivement une légère augmentation de la différence de teneur en eau ($W_{Mo} - W$) entre Ψ_{AE} et 0,003 bar puisque :

$\Psi_{AE} = 0,09$ bar	$W_{Mo} - W = 3,6 \%$
à 0,003 bar	$W_{Mo} - W = 5,6 \%$

Pour le sol le plus argileux (Vignères), les courbes de potentiel convergent nettement dans le domaine saturé (entre 0,05 et 2 bar).

Pour les deux derniers sols, la M.O. augmente la perte d'eau pour une augmentation de succion, entre deux valeurs du domaine saturé (ce qui revient à une diminution plus importante de la densité de l'échantillon riche en M.O. entre deux valeurs données du potentiel).

Résultats sur le retrait résiduel

Pour chacun de nos trois sols les moins argileux, nous avons cherché à ajuster la courbe $1/\rho_d = f(\log \Psi)$ entre Ψ_{AE} et Ψ_{LR} à une droite. Nous avons trouvé les régressions du tableau 45. Tous les coefficients de corrélation sont significatifs à moins de 1 %.

	regression $\frac{1}{\rho_d} = f(\log Y)$	coef. de corrélation	nombre de mesures
Limon 0-20	$\frac{1}{\rho_d} = -0,013 \log Y + 0,589$	-0,73 ***	22
L 20-40	$\frac{1}{\rho_d} = -0,008 \log Y + 0,562$	-0,66 **	20
Boigneville L2	$\frac{1}{\rho_d} = -0,030 \log Y + 0,636$	-0,94 ***	52
L0	$\frac{1}{\rho_d} = -0,031 \log Y + 0,584$	-0,94 ***	31
ST Paul 0-20	$\frac{1}{\rho_d} = -0,023 \log Y + 0,585$	-0,86 ***	15
L0-60	$\frac{1}{\rho_d} = -0,017 \log Y + 0,559$	-0,76 ***	15

** significatif au seuil de 1%.

*** significatif au seuil de 0,1%.

Tableau 45 : Regressions sur la courbe $\frac{1}{\rho_d} = f(\log Y)$ dans le domaine du retrait résiduel

Nous avons aussi testé l'égalité des coefficients de régression d'un même couple à l'aide du test de Student :

- Pour Boigneville et les limons, les deux coefficients de régression des échantillons avec et sans M.O. ne sont pas significativement différents ($t = 0,3$ et $t = 1,4$)
- Pour St Paul, ces deux coefficients sont différents à 1 % ($t = 3$). Néanmoins, pour ce dernier, le domaine du retrait résiduel est faible (1,5 à 20 bar), la différence des deux coefficients n'induit donc pas, dans ce domaine, une différence significative sur $(1/\rho_{M.O.} - 1/\rho)$ ($1/\rho_{M.O.}$ et $1/\rho$ étant respectivement les volumes massiques de deux échantillons riches et pauvres en M.O.).

Il semble donc que pour ces trois sols, la différence de densité entre avec et sans M.O. reste constante lors du retrait résiduel.

Pour St Paul et Boigneville, ces résultats confirment les faibles variations du gonflement potentiel mesuré (en effet, dans le domaine saturé, il n'y a pas de variation de la différence de densité $1/\rho_{M.O.} - 1/\rho$ pour ces deux sols). Même en corrigeant la plus forte teneur en argile de L_2 (26,7 %) par rapport à L_0 (24,4 %) on obtiendrait un G_p de 0,14 ce qui reste assez faible ; on peut penser que la M.O. n'induit donc pas de variation significative de $1/\rho_{M.O.} - 1/\rho$ lors du retrait résiduel.

Pour les limons, on a une plus forte variation de G_p mesuré qui s'explique par

- une légère augmentation (même non significative) de $1/\rho_{M.O.} - 1/\rho$ lors du retrait résiduel
- une augmentation de $1/\rho_{M.O.} - 1/\rho$ dans le domaine saturé.

Le retrait résiduel semble être assez voisin pour nos trois sols pauvres en argile.

4.3.3 Discussion et conclusion

Nous pouvons essayer de distinguer :

- le rôle de la M.O. dans les propriétés de la phase argileuse elle-même
- le rôle de la M.O. au sein du squelette.

Les deux résultats suivants :

- La convergence des courbes de potentiel pour de fortes valeurs du potentiel
- l'identité du volume poral de l'argile à sec qu'il y ait présence ou non de M.O.

et l'hypothèse de STENGEL (1981) selon laquelle l'humidité à la limite de retrait d'un mélange correspond à l'humidité au point d'entrée d'air de la phase argileuse du mélange nous amèneront à faire l'hypothèse que le complexe argilo-humique est peu modifié entre l'échantillon riche et l'échantillon pauvre en M.O.. Ceci implique que l'humidité au point d'entrée d'air de l'argile est indépendante de la teneur en M.O. donc que le potentiel ou l'humidité de la limite de retrait du mélange est indépendant de la teneur en M.O.. Nos résultats confirment bien ceci et renforcent donc notre hypothèse de départ.

Le parallélisme des courbes $1/\rho = f(\log \Psi)$ des deux échantillons riches et pauvres en M.O. semblent montrer que tout se passe comme si l'incrément de porosité induit par la M.O. n'était pas modifié par le gonflement retrait (Ceci semble surtout vérifié pour les sols à teneur en argile intermédiaire et est mis en défaut pour les fortes teneurs en argile).

Pour une même argile, les variations du squelette d'un sol modifient la valeur de Ψ_{AE} . Le fait que cette valeur ne soit pas modifiée par la teneur en M.O. signifie que la M.O. n'induit pas de variations significatives du squelette (relativement à cette variable). Cette tendance mériterait d'être approfondie puisque tous nos résultats ne la vérifie pas.

4.4 Résistance à l'écrasement d'agrégats arrondis

4.4.1 Agrégats secs

4.4.1.1 Naturels

a. Comparaison entre 4 sols différents

Pour chaque échantillon de sol, nous avons mesuré la résistance à l'écrasement de 60 agrégats. Nous avons comparé les moyennes par le test de Student.

Les résultats sont reportés dans le Tableau 4₆ et les histogrammes sur les Figures 4₇. Un test de χ^2 montre que les distributions des résistances à l'écrasement des échantillons avec et sans M.O. sont différentes pour tous les sols sauf pour les limons où les deux distributions sont identiques ($\chi^2 = 0,6$ à 3 d.l.).

St Paul et Boigneville montrent bien que la M.O. induit une diminution de la résistance à l'écrasement. Ils présentent effectivement des moyennes significativement différentes respectivement à 1,3 et 1 % et des distributions significativement différentes. Nous avons déjà vu sur d'autres populations d'agrégats de Boigneville L₀ (Cf. § 3), que la distribution semble bimodale (et peut être même trimodale). Bien que dans ce cas la forme de l'histogramme ne le montre pas explicitement, la dissymétrie de la distribution peut nous faire penser qu'il en est de même. Boigneville L₀ présenterait donc deux populations d'agrégats de résistances à l'écrasement différentes :

- Une première population de faible résistance à l'écrasement semble d'après l'histogramme peu différente de L₂.
- Une deuxième population dont la résistance à l'écrasement est plus forte. On peut penser que les 3 agrégats de L₂ isolés à de fortes contraintes sur l'histogramme sont du même type que ceux de cette population.

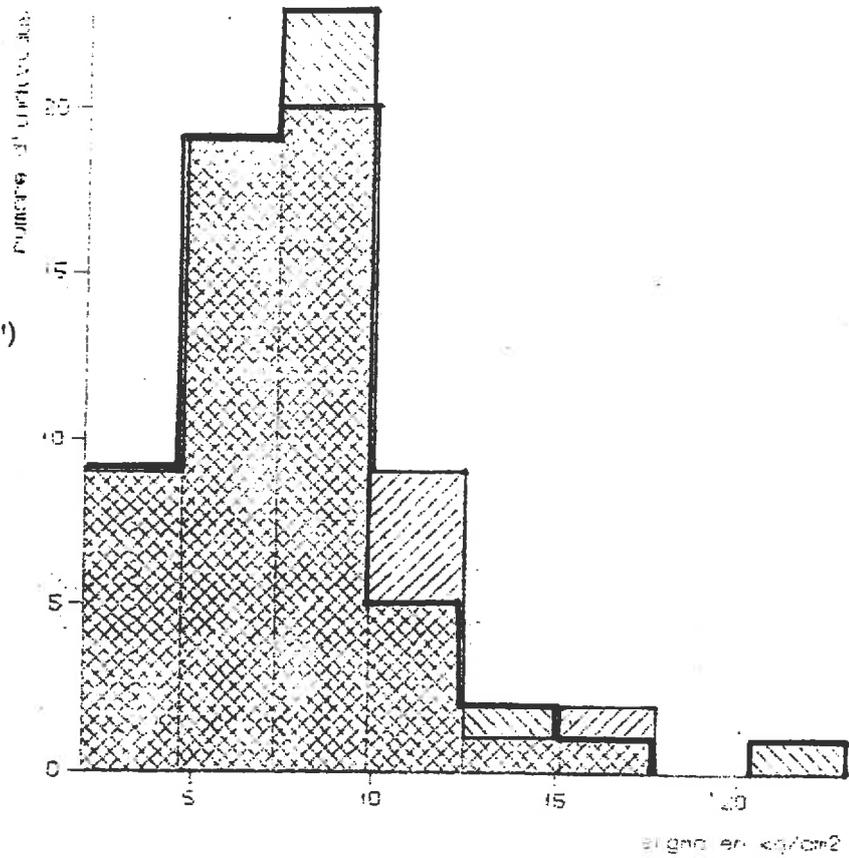
	Argile A%	Carbone			Densité à sec ρ_d	Resistance à l'écrasement σ_c - test sur $\mu\sigma$		Niveau de si- gnification α
		C _{Total}	C _{libre}	C _{lié}		$\mu\sigma$	Les $\mu\sigma$ sont différents	
Limon	0-20	1,04	0,27	0,77	1,75	7,4	2,7] NON >5%
	20-40	0,72	0,14	0,58	1,84	7,6	3,4	
Boigneville	L ₂	1,45	0,16	1,29	1,81	19,9	5,7] oui 1%
	L ₀	0,95	0,09	0,86	1,88	23,8	7,4	
St Paul	0-20	1,03	0,12	0,91	1,83	23,6	6,1] oui 1,3%
	40-60	0,81	0,06	0,75	1,89	26,6	7	
Les Vigneres	0-20	1,78	0,35	1,43	1,96	48,2	13,1] oui 1%
	20-40	1,28	0,19	1,09	1,96	41,6	11,2	
	40-60	0,64	0,04	0,6	2,02	47,2	11,4	

Tableau 46 Données sur les agrégats naturels arrondis pour les différents sols

LES LIMONS

 0-20 cm

 20-40 cm
(agrégats de type "R")



BOIGNEVILLE

 L₀

 L₂

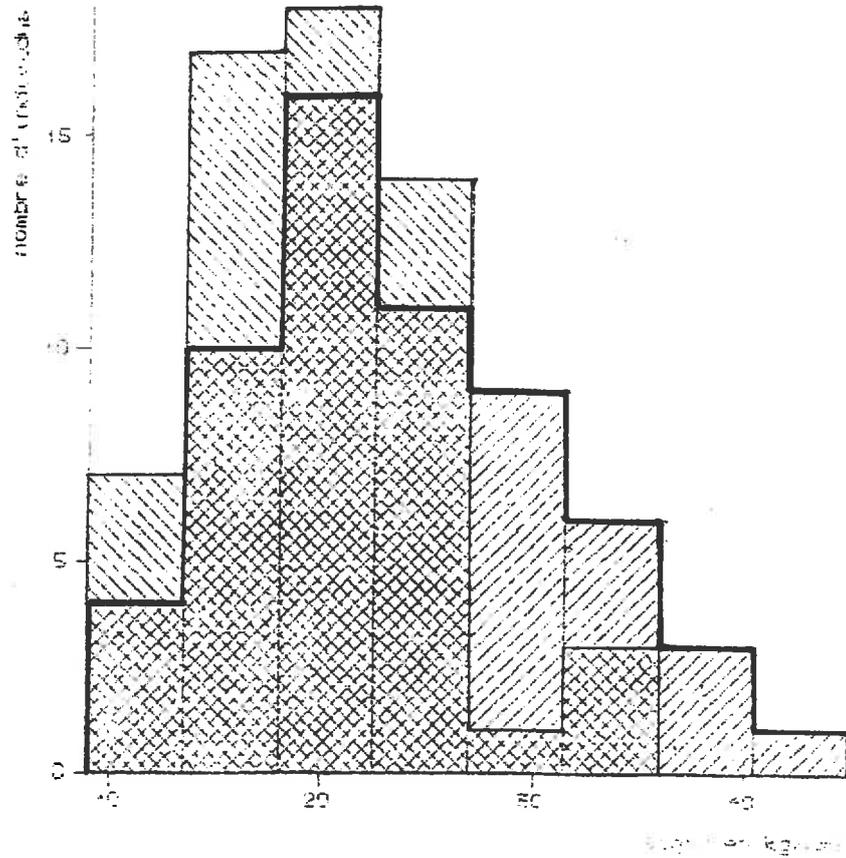
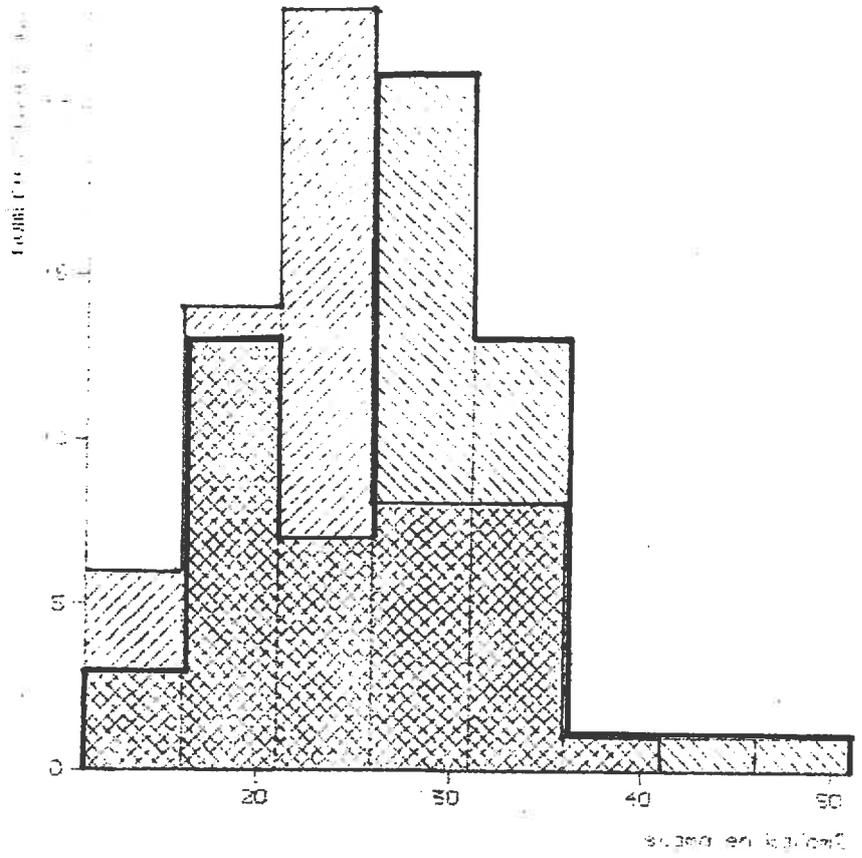


FIGURE 47 : Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats naturels (2-3 mm arrondis)

ST PAUL

-  0-20 cm
-  40-60 cm



LES VIGNERES

-  20- 40 cm
-  0-20 cm

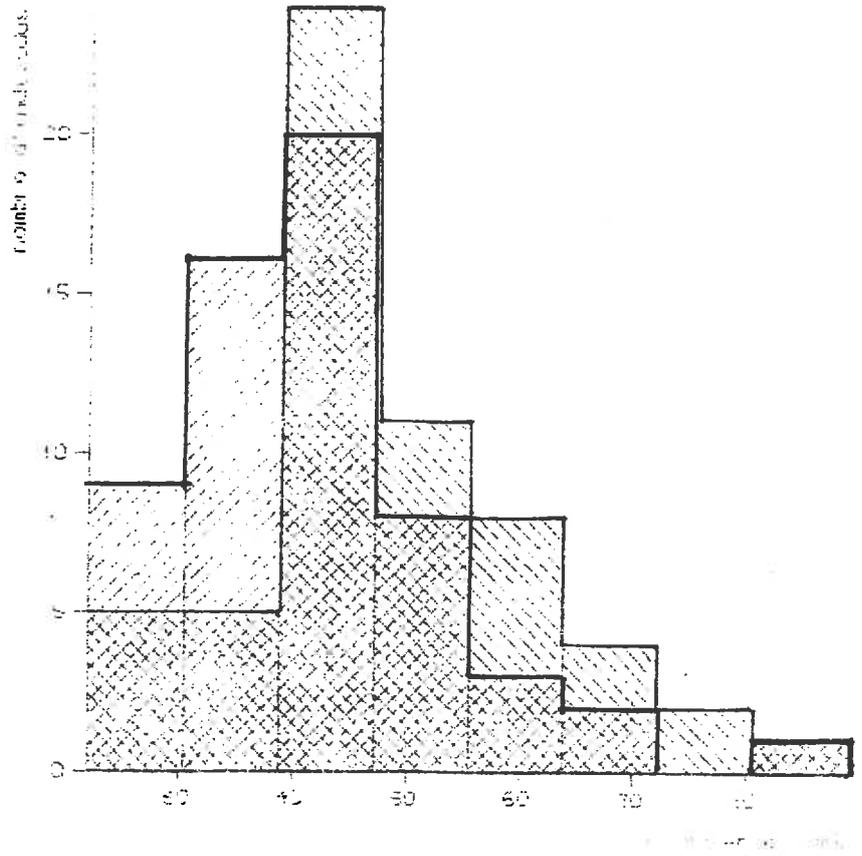
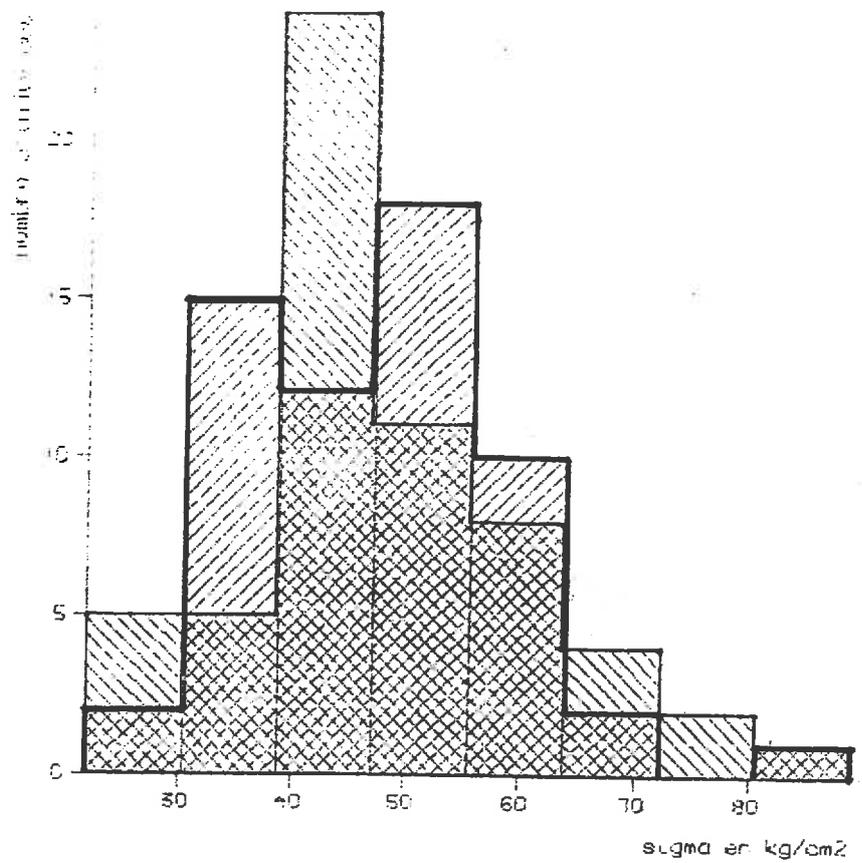


FIGURE 43 (suite) : Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats naturels (2-3 mm arrondis)

LES VIGNERES

 40-60 cm

 0-20 cm



LES VIGNERES

 40-60 cm

 20-40 cm

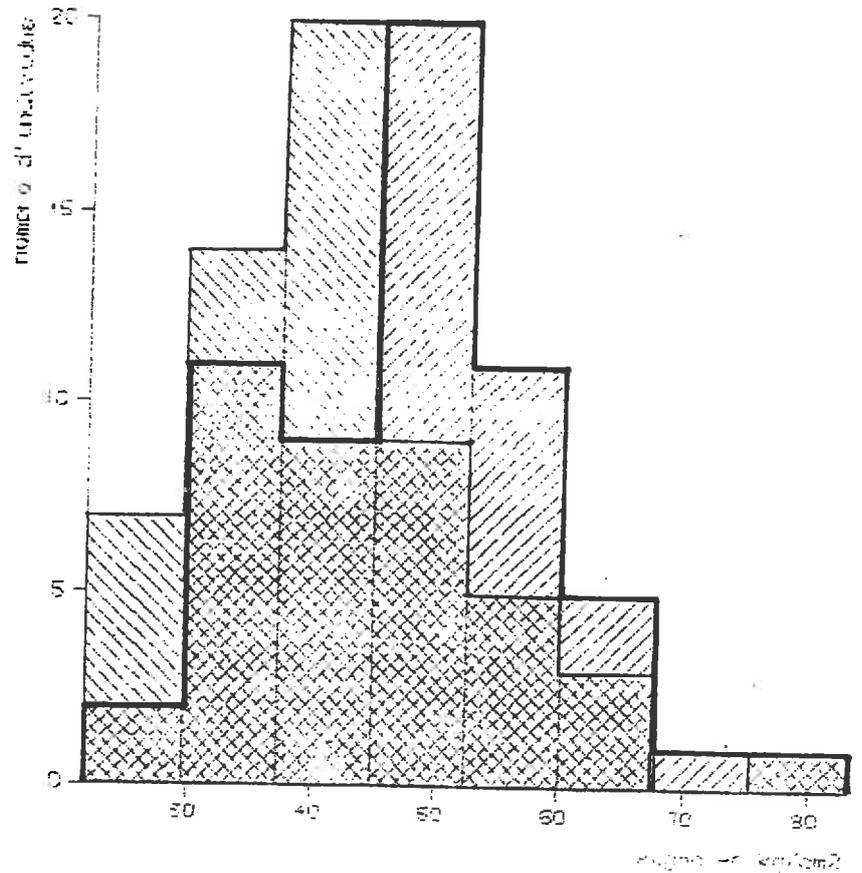


FIGURE 43: Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats naturels (2-3 mm arrondis)

Par contre Les Limons et les Vignères présentent des résultats moins nets :

- Les Limons (0-20 cm) et (20-40 cm) présentent deux populations de caractéristiques identiques (même distribution, même moyenne). Nous pouvons penser que la plus forte teneur en argile de l'échantillon 0-20 cm (par rapport au 20-40 cm) masque la diminution de la résistance à l'écrasement due au carbone.

- Les Vignères 40-60 cm présentent une résistance à l'écrasement significativement supérieure à celle du 20-40 cm (les deux distributions sont aussi différentes). Les Vignères 0-20 cm (riches en M.O.) ont par contre une résistance à l'écrasement plus forte que le 20-40 cm. Ceci peut s'expliquer par les deux points suivants :

- . L'hétérogénéité de la population 0-20 cm induit une mauvaise représentativité des 60 agrégats choisis (on remarque en effet que l'histogramme est étalé vers les fortes contraintes pour un mode identique à celui du 20-40).

- . Contrairement aux autres couples ces deux échantillons ont une même densité et un même volume de l'espace poral (l'effet de la M.O. est peut être différent).

Ces résultats semblent montrer que globalement un échantillon plus riche en M.O. a une résistance à l'écrasement plus faible.

Nos résultats ne sont pas, dans tous les cas faciles à interpréter :

- D'une part, pour un même échantillon, l'hétérogénéité inter-agrégats induit une variabilité de la résistance à l'écrasement et empêche d'accéder à des résultats plus précis. Nous avons déjà mis en évidence cette hétérogénéité pour Boigneville. Nous pensons que deux facteurs principaux peuvent l'expliquer :

- . L'hétérogénéité de teneur en M.O. inter-agrégats,
- . L'hétérogénéité de densité inter-agrégats (indépendamment de la M.O.)

Nos techniques de mesures rendent difficiles une mesure de résistance à l'écrasement et de densité sur une même population d'agrégats. Cette hétérogénéité s'avère donc difficile à maîtriser.

- D'autre part, certains facteurs sont mal quantifiés dans la comparaison de deux échantillons d'un même couple (par exemple la différence de teneur en argile).

Nous allons donc essayer de mieux quantifier l'effet de la M.O. en travaillant sur un seul échantillon.

b. Recherche d'une relation entre la résistance à l'écrasement et la teneur en M.O.

Démarche expérimentale

Nous avons pris les deux échantillons Boigneville L_0 et Boigneville L_2 . Pour chacun d'eux, nous avons effectué environ 200 et 500 mesures de résistance à l'écrasement (σ). Nous avons construit des classes de résistance à l'écrasement.

Après chaque mesure, l'agrégat est classé suivant la valeur de la résistance à l'écrasement. Nous avons poursuivi les mesures jusqu'à obtenir plus de 0,6 g d'agrégat par classe. Nous avons ensuite mesuré la teneur en carbone totale de chaque classe. Les résultats sont reportés sur le Tableau 4₇.

Résultats sur couple : Boigneville

Boigneville L_2

Nous pouvons mettre en évidence une relation entre classe de résistance à l'écrasement et de teneur en M.O.. Nous avons porté sur le Figure 4₈ la résistance à l'écrasement moyenne d'une classe en fonction de sa teneur en M.O. moyenne (les chiffres correspondent au nombre de mesures effectuées).

Cette relation s'ajuste à l'équation :

$$\log_{10} \sigma = - 2,96 \log_{10} C + \% + 1,91$$
$$r = - 0,98 \text{ (significatif à } 0,1 \text{ \%)}$$

Nous avons aussi porté sur la Figure 4₇ les moyennes des résistances à l'écrasement d'agrégats remaniés de Boigneville L_0 et L_2 (Tableau 4₆). Nous constatons :

- Que la moyenne de L_2 remanié se situe sur la courbe.
- Que la moyenne de L_0 remanié se situe nettement au-dessous

de la courbe.

Pourtant, L_0 a une constitution granulométrique voisine de celle de L_2 et une histoire hydrique semblable à celle de L_2 remanié.

BOIGNEVILLE L2

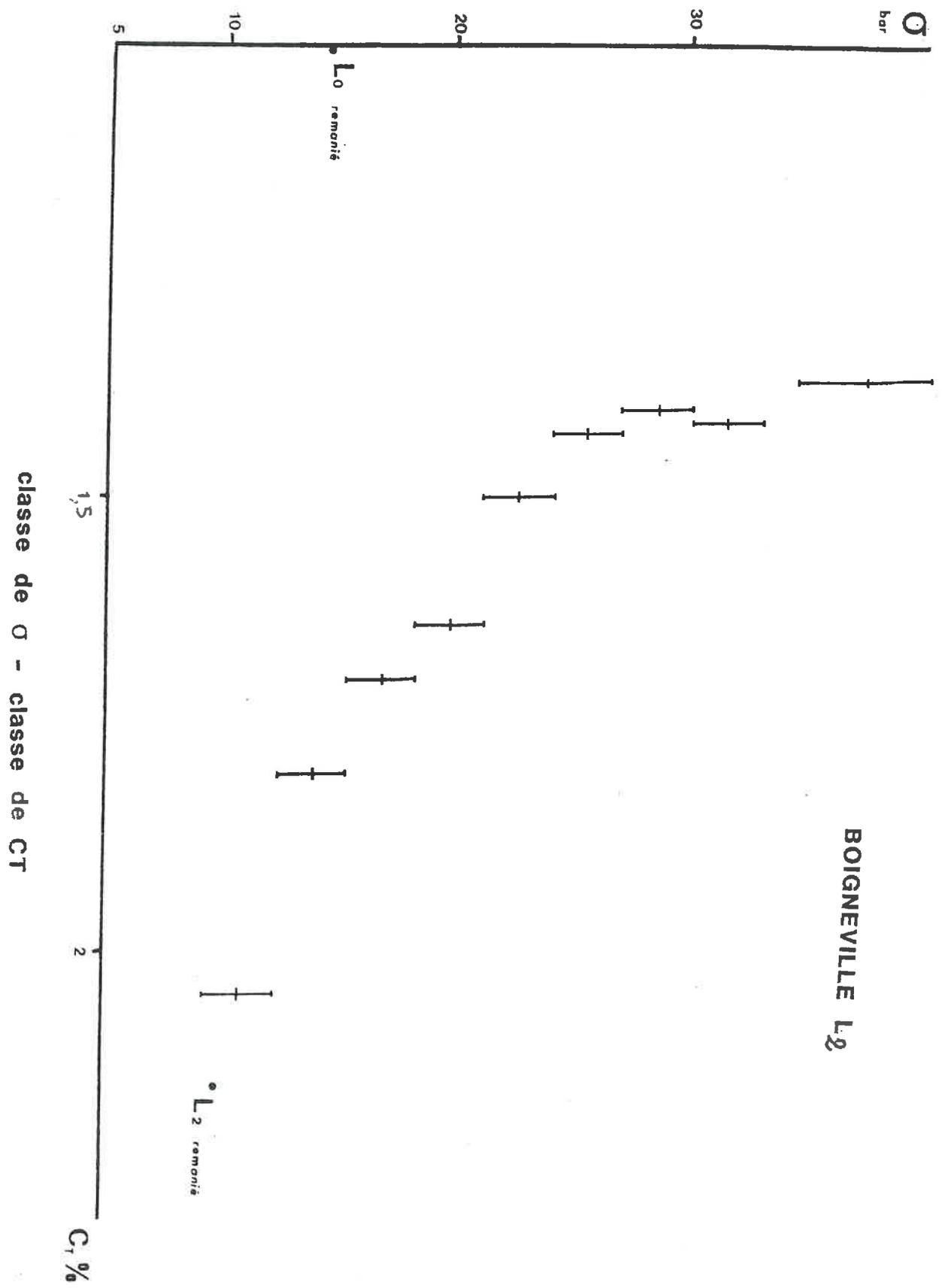


Figure 48

L ₂		L ₀	
σ moyen en bar	C _T %	σ moyen en bar	C _T %
10,5 ± 1,5	2,05		
13,5 ± 1,5	1,80	16,5 ± 1,5	0,96
16,5 ± 1,5	1,7		
19,5 ± 1,5	1,64		
22,5 ± 1,5	1,5	22,5 ± 1,5	0,95
25,5 ± 1,5	1,43	25,5 ± 1,5	0,90
28,5 ± 1,5	1,40	28,5 ± 1,5	0,94
31,5 ± 1,5	1,42	31,5 ± 1,5	0,92
		34,5 ± 1,5	0,94
37,5 ± 3,1	1,37	37,5 ± 1,5	0,91
		> 39	0,89

Tableau 47 correspondance entre classe de resistance à l'écrasement (σ) et classe de teneur en carbone total (C_T) pour BOIGNEVILLE L₀ et L₂

Il est donc difficile d'extrapoler la courbe de l'échantillon L_2 à d'autres échantillons de constitution granulométrique semblable. Ceci signifie que notre variable "résistance à l'écrasement" est dans ce cas modifiée par d'autres phénomènes que la variation de teneur en M.O..

Ces phénomènes peuvent être :

- Des localisations ou (et) des natures différentes de la M.O.,
- Des différences de structure indépendante de la variation de teneur en M.O. et liées par exemple à des histoires différentes des agrégats.

Si l'on prend par exemple la classe L_2 de plus forte résistance à l'écrasement ($\mu = 37,5$), on s'aperçoit que cette valeur est supérieure à toutes les moyennes calculées sur St Paul (remanié ou non) qui a une teneur en argile plus forte et une teneur en M.O. plus faible ou équivalente et aux moyennes calculées sur Boigneville. On peut supposer qu'un facteur autre que la teneur en M.O. intervient (densité des agrégats, nature de la M.O.). Il serait intéressant de mesurer pour chaque classe la densité des agrégats et les teneurs en carbone libre et lié. Ceci nous permettrait peut être de mieux quantifier l'influence de la M.O. sur la résistance à l'écrasement.

Boigneville L_0

Pour Boigneville L_0 , la variabilité de la résistance à l'écrasement n'est pas expliquée par des différences de teneur en carbone. Nous pouvons penser qu'un facteur "hétérogénéité de densité" des agrégats explique cette variabilité. Sur cette population de 200 agrégats, nous avons trouvé une moyenne de résistance à l'écrasement de 33 bars environ. Cette valeur est beaucoup plus élevée que la moyenne que nous avons trouvée sur 60 mesures (Cf. Tableau 4₆). Mais elle correspond à un mode de la population bimodale de Boigneville L_0 (Cf. Histogrammes § 3) c'est-à-dire à la sous population caractérisée par une forte résistance à l'écrasement (la mauvaise représentativité de cet échantillon est en partie dû à un mauvais échantillonnage lors du prélèvement du sol).

Conclusion

Sur un sol en semis direct (L_2), nous avons facilement mis en évidence une influence de la M.O. sur la résistance à l'écrasement. Par contre, sur un sol en labour traditionnel (L_0), nous avons constaté une variabilité de la résistance à l'écrasement du même ordre que pour L_2 pour une faible variabilité de la teneur en M.O..

Il apparaît donc une forte interaction entre influence de la M.O. sur la résistance à l'écrasement et contraintes anthropiques que subit le sol.

Il est apparu dans l'étude, de nos deux échantillons, une influence probable de la densité qui peut interagir avec l'effet de la M.O.. Pour éliminer cette variable, nous avons fabriqué des échantillons remaniés.

4.4.1.2 Agrégats remaniés

Les résultats sont reportés dans le Tableau 4₈.

Nous avons mesuré les teneur en carbone total des agrégats arrondis pour chaque sol qui s'avèrent peu différentes des valeurs de l'analyse du "tout venant" du même sol. Nous supposons donc qu'il en est de même pour les teneurs en carbone libre et nous prendront les valeurs de l'analyse du "tout venant".

Comme précédemment, nous avons calculé moyenne, écart-type et établi l'histogramme de répartition des résistances à l'écrasement pour chaque échantillon (60 mesures par échantillon) (Cf. Tableau 4₈ et Figure 4₉).

Pour tous les couples, les échantillons avec et sans M.O. présentent :

- Des distributions différentes,
- Des moyennes significativement différentes à moins de 1 % (test de Student).

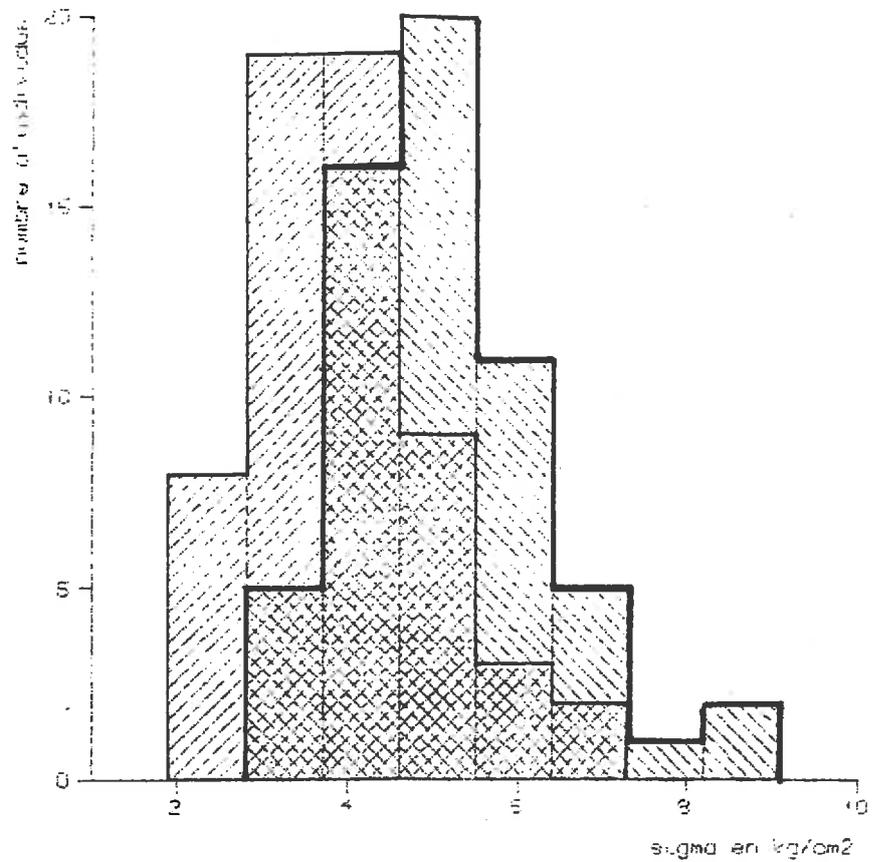
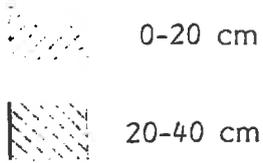
Nous retrouvons les mêmes tendances que sur les agrégats naturels : la M.O. induit une diminution de la densité et de la résistance à l'écrasement. Cette diminution de la résistance à l'écrasement due à la M.O. est plus significative sur les agrégats remaniés que sur les agrégats naturels. Ceci provient de deux facteurs :

- La diminution de l'hétérogénéité inter-agrégats (les coefficients de variation sont plus faibles dans le cas des agrégats remaniés),
- Une augmentation de la différence de teneur en carbone entre les échantillons remaniés avec et sans M.O. ce qui augmente la différence des résistances à l'écrasement.

Tableau 48 Données sur les agrégats arrondis remaniés pour les différents sols

		Carbone			Densité à sec ρ_d	résistance à l'écrasement σ	
		C_{Total}	C_{libre}	$C_{lié}$		$\mu\sigma$	$S\sigma$
Limon	0-20	2,03	1,2	0,83	1,52	4	1,1
	20-40	0,57	0,08	0,49	1,69	5,2	1,2
Boigneville	L ₂	2,12	0,36	1,76	1,53	8,7	2,5
	L ₀	0,98	0,12	0,86	1,71	14,5	3,2
St Paul	0-20	1,42	0,16	1,26	1,73	12,6	2,6
	40-60	0,78	0,06	0,72	1,82	24,6	5,1
Les Vigneris	0-20	2,21	0,64	1,57	1,78	45,3	10,3
	20-40	1,56	0,25	1,31	1,84	49,6	8,5
	40-60	0,68	0,05	0,63	1,91	66,2	14,4

LES LIMONS



BOIGNEVILLE

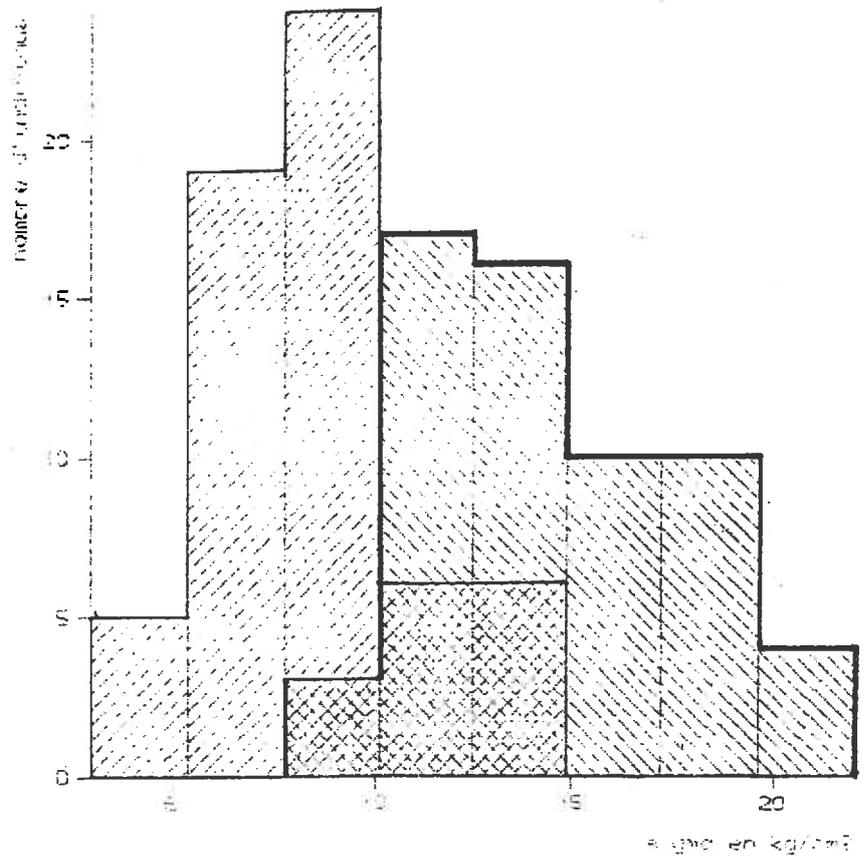
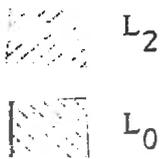
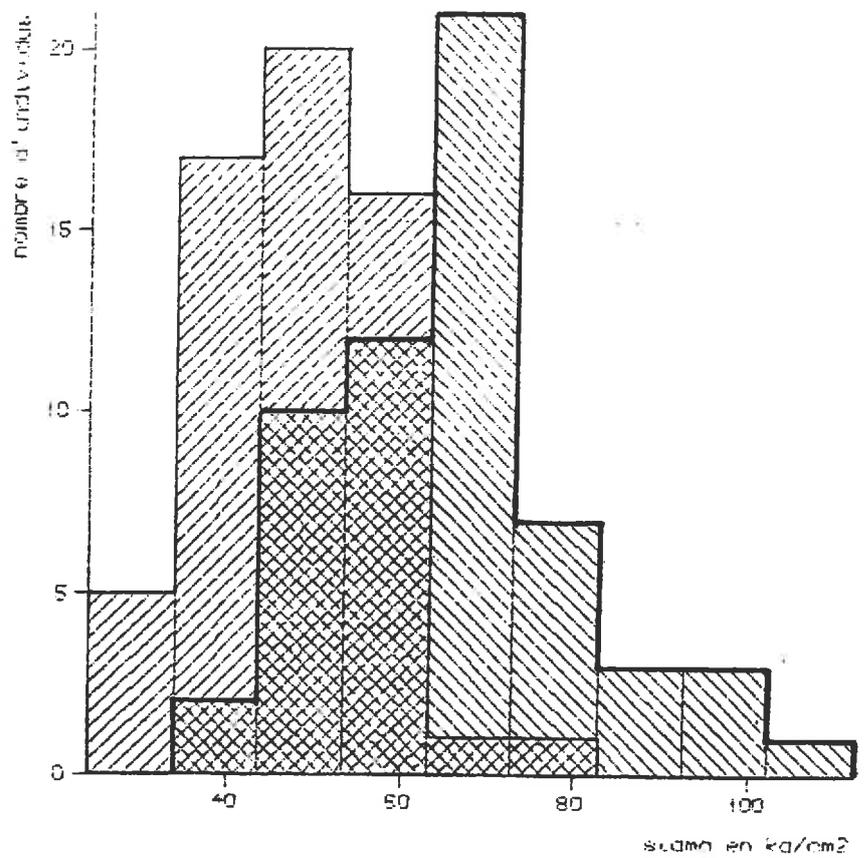
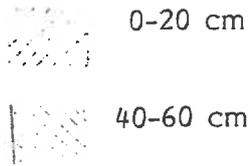


FIGURE 4a : Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats remaniés (2-3 mm arrondis)

LES VIGNERES



LES VIGNERES

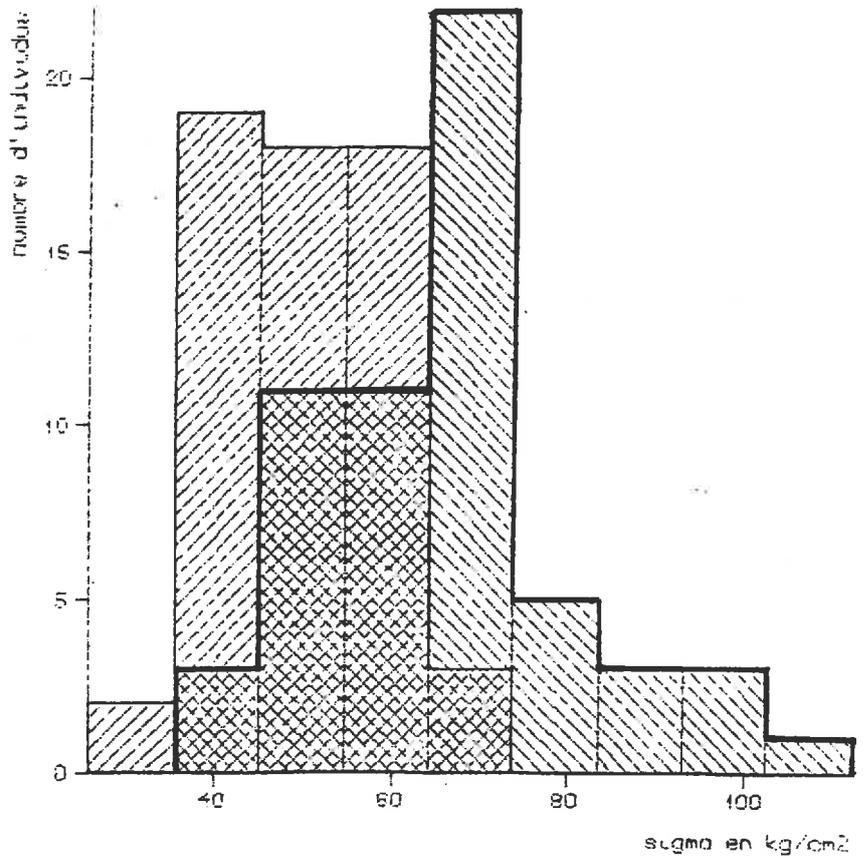
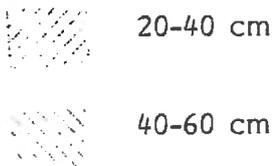
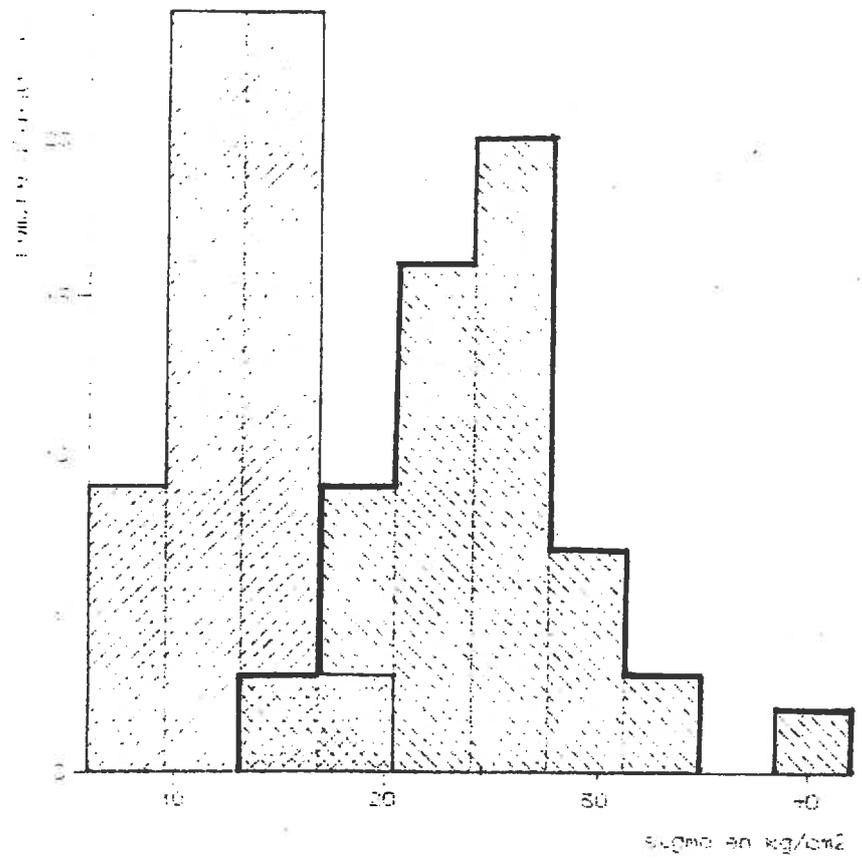


FIGURE 49 (suite) : Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agregats remaniés (2-3 mm arrondis)

ST PAUL

-  0-20 cm
-  40-60 cm



LES VIGNERES

-  0-20 cm
-  20-40 cm

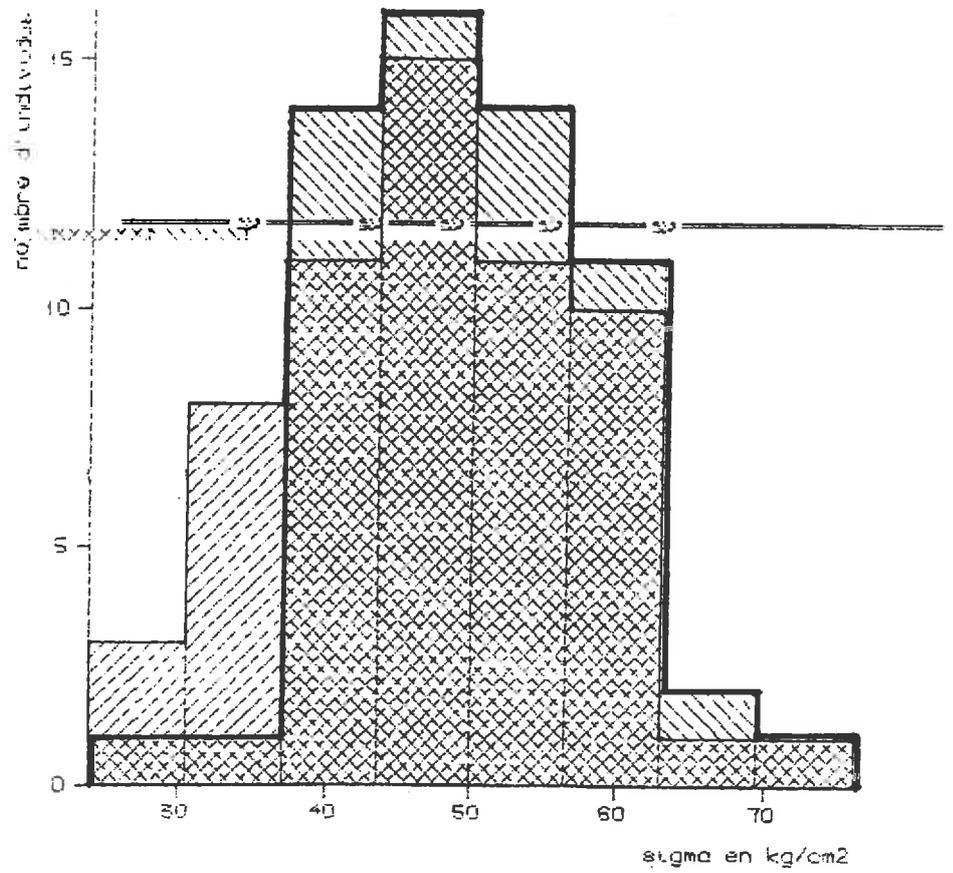


FIGURE 49 (suite) : Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats remaniés (2-3 mm arrondis)

4.4.2 Relation teneur en M.O.-Résistance à l'écrasement pour les différents sols

Nous avons recherché une relation entre moyenne des résistances à l'écrasement (σ) de nos 18 échantillons (naturels et remaniés), teneur en argile et une variable représentative de l'influence de la M.O.. Nous avons obtenu la meilleure corrélation double avec la variable carbone lié ($C_{lié}$) : (A et $C_{lié}$ présentent un coefficient de corrélation faible de 0,35)

$$\sigma = 1,39 A - 7,43 C_{lié} - 8,51$$

Le test de Fisher nous donne les valeurs suivantes :

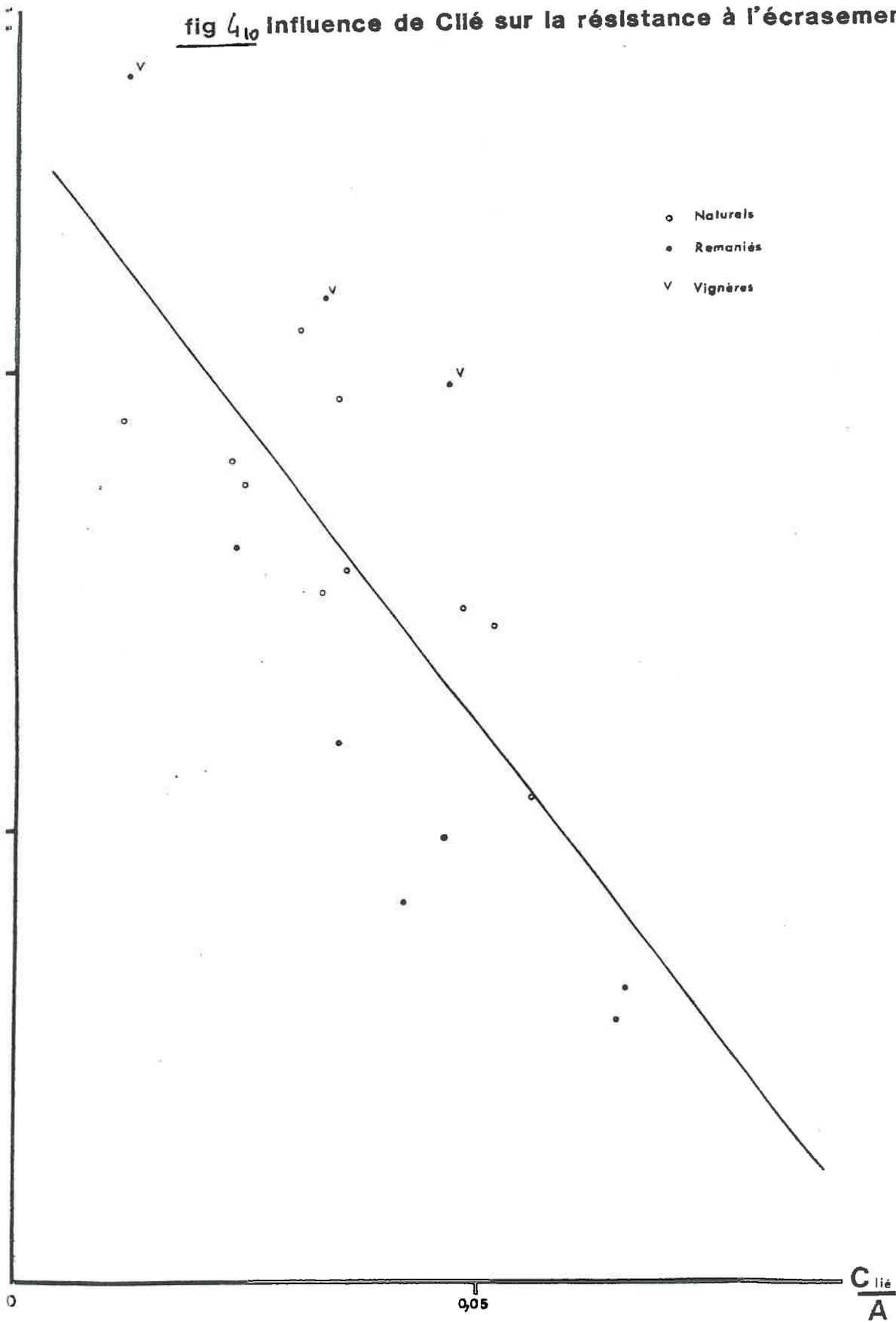
	F-ratio	Niveau de signification
Régression	67	0,1 %
Constante	3,6	7,6 %
Argile (A)	127	0,1 %
$C_{lié}$	4,1	6,2

L'argile présente un coefficient de régression très significatif et explique la plus grande part de la variance. Nos données (Tableaux 4₆ et 4₇) montrent effectivement une influence prépondérante de l'argile sur la résistance à l'écrasement. La part du modèle expliquée par la variable $C_{lié}$ est beaucoup plus faible. Le niveau de signification du coefficient de régression est d'autre part assez faible (6,2 %). Comme le niveau de signification de la constante est faible, nous avons représenté cette régression double en portant σ/A en fonction de $C_{lié}/A$ (ceci revient à supposer que la constante de notre régression est nulle). Nous avons ainsi établi une régression entre ces deux variables ($r = - 0,76$ est significatif à 0,1 %). Ceci est plus qu'un artifice de calcul car la variable $C_{lié}/A$ a une signification physique. Nous avons trouvé la régression suivante (Figure 4₈)

$$\sigma/A = - 13,3 \frac{C_{lié}}{A} + 1,28$$

Le test de Fisher (F = 22) pour 1 et 16 d.l.) montre que le coefficient de régression est différent de 0 ($\alpha = 1$ %).

fig 4₁₀ Influence de Clé sur la résistance à l'écrasement



Cette régression représente bien l'effet de $C_{\text{lié}}$ sur les 6 échantillons remaniés les plus pauvres en argile (St Paul, Boigneville, Les Limons). Par contre, pour le sol argileux remanié (Les Vignères), la correction de la teneur en argile ne semble pas avoir été suffisante. (cf. Figure 410)

Nous avons aussi calculé la régression $\sigma/A = f(C_T/A)$ (Figure 49) nous avons trouvé (sur 17 points en excluant l'échantillon remanié Limon 0-20 qui contient plus de 1 % de carbone libre) (cf. Figure 411)

$$\sigma/A = - 9,79 \frac{C_T}{A} + 1,28$$

Le coefficient de régression est différent de 0 à 1 %.

Nous avons porté sur cette même figure, les points de la courbe de la Figure 48 (résistance à l'écrasement par classe en fonction de la teneur en carbone total). Les points de cette dernière courbe s'ajustent assez bien au nuage de $\sigma/A = f(C_T/A)$ bien que la pente soit plus forte. Les deux classes à forte cohésion sont en dehors du nuage. Ceci va dans le sens de notre première présomption : pour les classes de forte résistance à l'écrasement (Figure 48) peut intervenir un autre facteur que la teneur en M.O..

Le test de Student nous montre que les deux coefficients de régression (1) et (2) ne sont pas significativement différents ($t = 0,3$ à 31 d.l.). Ceci nous confirme que, dans nos sols (où en général la teneur en carbone libre est inférieure à 1/6 de la teneur en carbone lié), le carbone libre n'a pas d'influence significativement différente de celle du carbone lié sur la cohésion.

Se pose alors le problème de la représentativité de nos échantillons vis-à-vis de la variabilité naturelle de teneur en carbone libre. On peut penser que cette variabilité est plus importante que la variabilité de teneur en carbone lié (à peu près liée à la teneur en argile). Il serait donc intéressant :

- De quantifier l'effet du carbone libre (par exemple en faisant varier sa teneur sur des échantillons remaniés),
- D'évaluer l'hétérogénéité de répartition d'inter-agrégats du carbone libre.

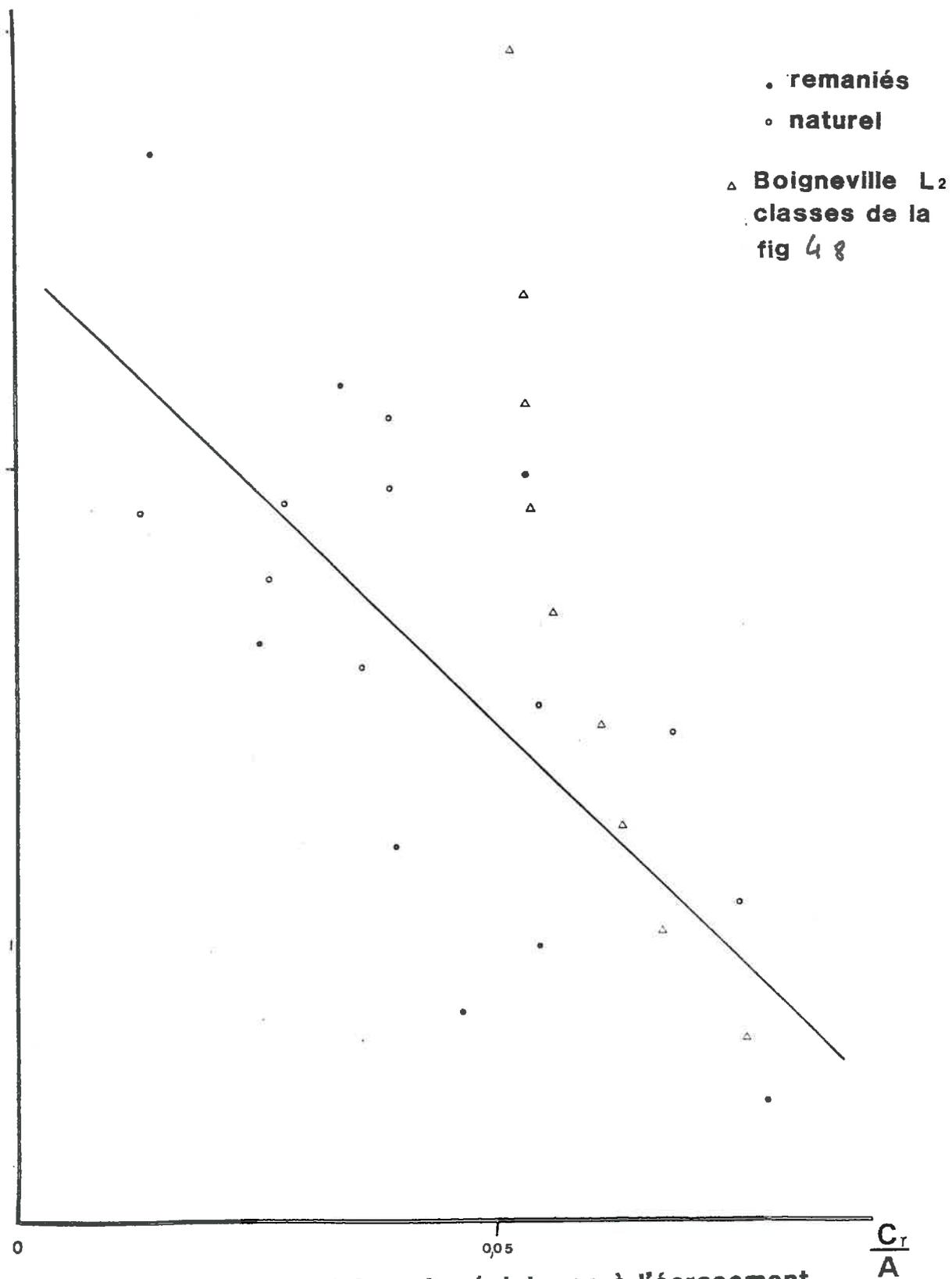


fig 411: influence de CT sur la résistance à l'écrasement

4.4.3 Conclusion

Nous avons montré , dans ce chapitre, que la M.O. induit une diminution de la résistance à l'écrasement des agrégats secs de 2-3 mm sur des sols de teneur en argile variée. Cet effet dépend de la teneur en argile : plus le sol est riche en argile, plus l'efficacité de la M.O. est faible.

Est apparue aussi, au cours de ce chapitre, la difficulté d'isoler l'effet de la M.O. sur la résistance à l'écrasement d'une population d'agrégats. Ceci est dû principalement :

- A une forte hétérogénéité inter-agrégats,
- A une forte sensibilité de la variable résistance à l'écrasement à d'autres variables que la simple teneur en M.O. (par exemple à la densité).

Une étude plus approfondie viserait à mesurer sur une même population d'agrégats

- La résistance à l'écrasement,
- La teneur en carbone (libre et lié),
- La densité.

Il faut pour cela trouver une astuce technique qui permette de combiner les deux dernières mesures qui sont toutes les deux destructives.

Il est néanmoins possible que d'autres facteurs, plus difficiles à quantifier modifient la résistance à l'écrasement telles la nature de la M.O. (une distinction plus précise que Carbone libre - Carbone lié peut être nécessaire) ou sa localisation dans l'agrégat.

Les moyennes et écart-type de la résistance à l'écrasement calculés sur une population d'agrégats ne permettent en rien de prévoir le comportement global de cette population. Etant donné l'hétérogénéité de localisation de la M.O., les classes extrêmes de résistance à l'écrasement peuvent prendre une part déterminante dans ce comportement. Ils deviendront dans ce cas plus lourds à prévoir.

4.5 Influence de l'humidité

Nous avons porté sur les Figures 4₁₂ et 4₁₃, la courbe résistance à l'écrasement en fonction de l'humidité [$\sigma = f(W\%)$] pour 2 sols Boigneville L₂ et L₀.

Nous avons porté aussi sur ces mêmes figures les moyennes de résistance à l'écrasement de 60 individus portés à 1,5 et 15 bars (les moyennes et écarts types sont reportés sur le Tableau 4₉ et les histogrammes sur la Figure 4₁₄). Ces deux courbes montrent (comme nous l'avons déjà mentionné) une très forte variation de la cohésion pour les faibles humidités.

Au-delà de 10 % d'humidité, les courbes des 2 sols semblent se superposer. La résistance à l'écrasement à 1,5 bar est elle aussi strictement identique pour les deux sols. Remarquons toutefois que les premières mesures sont effectuées à une plus forte humidité pour L₂ que pour L₀ mais à un même potentiel pour les 2 sols (0,5 bar). Ces premières mesures correspondent à peu près au moment où il est techniquement possible de mesurer la résistance à l'écrasement.

En deçà de 10 % d'humidité, la superposition des deux courbes est moins nette. On remarque de plus que :

- Les 2 moyennes des 60 mesures à 15 bars sont significativement différentes à 5 % entre L₀ et L₂. Les histogrammes semblent aussi décalés (mais un test de χ^2 n'est pas significatif) (Cf. Figure 4₁₄).

- Les dix mesures effectuées sur des agrégats secs à l'air (Cf. Figures) donc à un même potentiel semblent montrer une résistance à l'écrasement plus forte pour L₀ (en particulier, la moyenne de ces dix mesures est plus forte pour L₀ que pour L₂).

Nous pouvons penser qu'à partir d'un certain potentiel (15 bars), l'influence de la M.O. sur la résistance à l'écrasement se manifeste.

Nous avons vu précédemment que la variable potentiel apporte une bonne estimation d'un comportement mécanique tel le gonflement-retrait quel que soit la teneur en M.O. Bien que cela ne semble pas être tout à fait le cas pour un comportement tel la résistance à l'écrasement, il serait intéressant d'approcher un tel comportement à différentes teneurs en M.O. en fonction du potentiel.

Cette partie devrait être plus approfondie. Elle correspond, en effet, à l'étude de l'interaction des 3 variables que nous avons étudiées séparément (potentiel, gonflement-retrait et résistance à l'écrasement). A cause du temps limité qu'impose le stage, nous regrettons de ne pas avoir pu le développer.

BOIGNEVILLE L₂

$$\sigma = f(W\%)$$

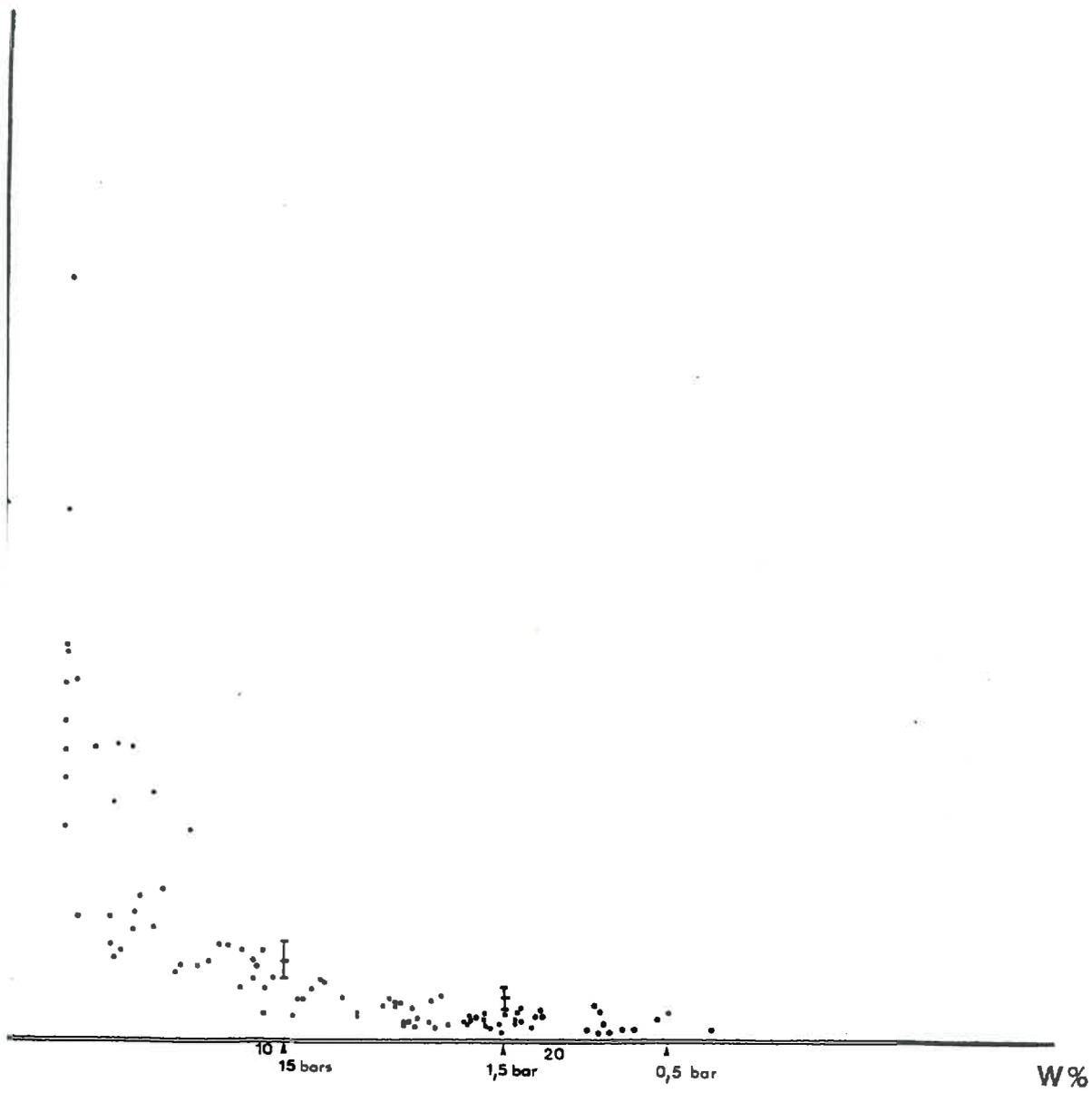
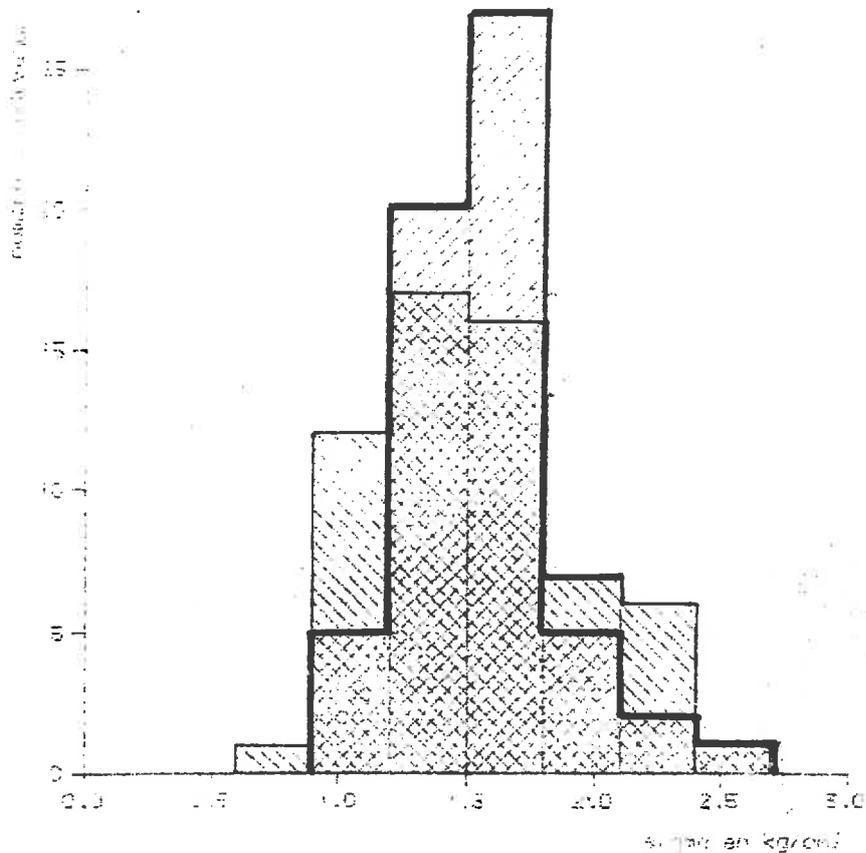
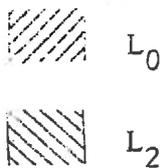


Figure 413

Succion	1,5 bar		15 bar	
resistance à l'écrasement	$\mu\sigma$	$S\sigma$	$\mu\sigma$	$S\sigma$
BOIGNEVILLE L ₀	1,57	0,26	3,11	0,48
BOIGNEVILLE L ₂	1,56	0,39	2,9	0,66

Figure 49 : Moyenne et écart type de la résistance à l'écrasement de 60 agrégats portés à différents potentiels

1,5 bar



15 bars

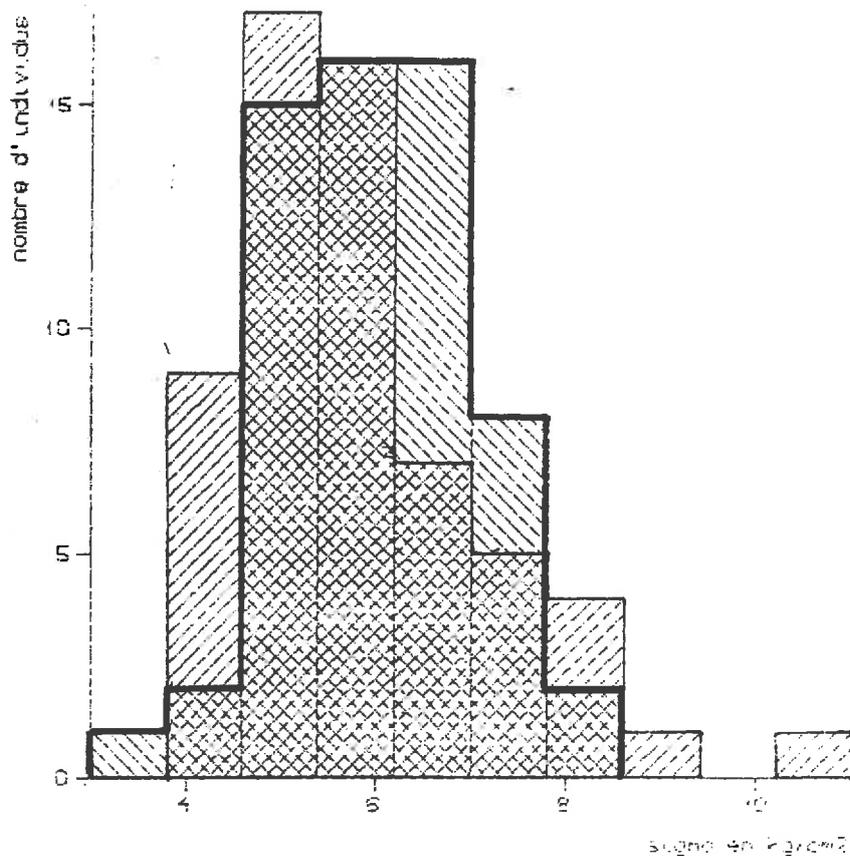
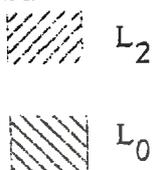


FIGURE 414: Histogrammes de répartition de la résistance à l'écrasement (sigma) d'agrégats portés à 1,5 et 15 bars (BOIGNEVILLE)

CONCLUSION

Toute une partie de ce mémoire a été consacrée à la mise au point d'une méthode de mesure de la résistance à l'écrasement qui jusqu'à présent ne semblait pas avoir été faite. Elle nous a permis de mettre en évidence la très grande sensibilité de cette variable vis-à-vis de l'hétérogénéité naturelle des agrégats d'un même sol. Ces deux facteurs rendent donc son interprétation difficile et expliquent les résultats antérieurs disparates sur des couples de sol. Nous avons donc essayé de maîtriser certains facteurs (forme de l'agrégat, humidité) et nous nous sommes servis de l'hétérogénéité de teneur en M.O. d'un même sol pour étudier l'effet de la M.O. à différents teneurs, sur la résistance à l'écrasement.

Nous avons mis en évidence trois effets généraux de la M.O. sur les propriétés d'agrégats :

- elle augmente la rétention d'eau à un potentiel donné (et surtout pour de faibles succions)
- elle augmente le volume poral
- elle diminue la résistance à l'écrasement à sec

Notre trop faible nombre d'échantillons ne nous permet pas d'interpréter les interactions avec la texture.

L'interprétation des courbes de gonflement retrait en potentiel nous a amené à supposer d'une part que le comportement de la phase argileuse n'est pas modifié par les variations de teneur en M.O. et d'autre part qu'il ne semble pas y avoir d'interaction entre comportement de la M.O. et retrait du sol. Il serait intéressant d'approfondir ces hypothèses sur d'autres types de sol. Le potentiel semble donc une variable explicative nécessaire pour interpréter l'effet M.O. Les relations $\sigma = f(W\%)$ mériteraient aussi d'être approfondies ce qui présenterait un progrès pour le passage au champ cultivé (où l'intérêt de la notion de résistance à l'écrasement se conçoit en fonction de l'humidité). Notre choix au départ de ces trois variables semble donc se justifier.

Malgré une approche méthodologique approfondie, notre étude butte parfois à cause d'une mauvaise maîtrise du facteur densité et de ses interactions avec la teneur en M.O.. La suite logique de ce mémoire serait donc une étude systématique, sur plusieurs sols des trois variables densité, potentiel et résistance à l'écrasement en fonction de la teneur en M.O., ce qui pose comme nous l'avons déjà montré certains problèmes techniques et méthodologiques.

A long terme, d'autres variables telles la nature de la M.O., sa localisation dans l'agrégat peuvent se révéler aussi intéressantes.

Il est possible ensuite d'envisager le passage à l'échelle structurale en modélisant le sol comme un ensemble d'agrégats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AKROUME C., 1985** - Localisation et caractérisation de la M.O. des sols. Définition d'un modèle d'évolution.
Thèse de Docteur Ingénieur, p. 43-54.
- BRAUNACK M.V. ; MEWITT J.S. and DEXTER A.R., 1979** - Brittle fracture of soil aggregates and the compaction of aggregate beds.
Journal of Soil Science, 30, 653-667.
- CLARKE, GREENLAND and QUIRK, 1967** - Changes in some physical properties of the surface of an impoverished red brown earth under pasture.
Aust. J. Soil Res., 5, 59-68.
- CHAMAYOU** - L'eau et le sol
ENSAM, Document interne.
- FIES J.C., 1984** - Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile squelette : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure.
Agronomie, 4 (9), 891-899.
- FIES J.C. et STENGEL P., 1981** - Densité texturale de sols naturels.
Agronomie, 1 (8), 651-666.
- FIES J.C. et STENGEL P., 1984** - Relations entre la constitution granulométrique et minéralogique et les caractéristiques de l'espace poral des sols.
AFES, Livre Jubilaire du Cinquantenaire.
- FRANKLIN A.J., OROZLO L.F., SEMRAU R., 1973** - Compaction and strength of slightly organic soils.
ASCE J. Soil Mech. Found. Div., 99 SM7, n° 9873 : 541-557.
- GRIERSON I.T., KIJNE J.W., GREENLAND D.J., 1972** - Changes in some physical properties of red brown earth of different texture associated with increasing content of organic matter.
S. Aust. Dep. Agr. Exp. Rec., 6, 16-22
- GUCKERT A.,** - Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les mécanismes d'agréation.
Thèse Doct. Etat Univ. NANCY, p. 124.
- HAMBLIN A.P., DAVIES D.B., 1977** - Structural features of aggregates in some East Anglian Silt Soils.
J. of Soil Sci., 28-1, 23-28.
- HARTGE K.H., 1975** - Organic matter contribution to stability of soil structure
In Soil conditioners, Soil Sc. Soc. of America,
In South Segoe Road, Madison, Wis. 53711 USA.
- HARTMANN R., 1976 t** - The influence of soil conditioners on the liquid-solid contact angles of sands and silt loams.
Soil Sc., 121-6, 346-352.

- HIRAMATSU Y. et OKA Y., 1966** - Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece.
Int. J. Rock Mech. Min Sci., Vol 3, pp. 89-99, Pergamon Press Ltd.
- HOLLIS J.M., JONES R.J.A., PALMER R.C.,** - The effect of organic matter and particle size on the water retention properties of some soils in the west midlands of England.
- KEZDI, 1974** - Handbook of soil Mechanics, Vol. 1
Soil Physics, Elsevier ed., Amsterdam, 220 p.
- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973** - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol.
Ann. agron., 24 (5), 533-545.
- PINOCHET X.,** - Prévision du retrait gonflement d'agrégats de sol. Relation avec le potentiel de l'eau.
INRA-Science du Sol- Avignon, Document interne.
- QUIRK J.P. et PANABOKKE C.R., 1962** - Incipient failure of soil aggregates.
Journal of Soil Science, Vol 13, n° 1, p.
- ROGOWSKY A.S., MOLDENHAUVER W.C., DON KIRKHAM, 1968** - Rupture Parameters of soil Aggregates.
Soil Sci. Soc. of Am. Proc., 32/5, 720-724.
- ROGOWSKY A.S. et DON KIRKHAM, 1976** - Strength of soil aggregates : influence of size, density and organic matter content.
Med. Fac. Landbouww. Rijksuniv. Gent 41/1.
- STENGEL P., 1979** - Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ.
Ann. agron., 30(1), 27-51.
- STENGEL P., 1981** - Etude expérimentale du retrait de mélanges argile-limon.
Non publié.
- UTOMO W.H. et DEXTER A.R., 1981** - Soil friability.
Journal of Soil Science, 32, 203-213.
- THENG B.K.G., 1979** - Formation and properties of clay polymer complexes
Elsevier scientific publishing Company, p. 362.

ANNEXES

ANNEXE 1

DETERMINATION DU GONFLEMENT POTENTIEL

COURBES DE RETRAIT D'AGREGATS

I. PRINCIPE

Les agrégats sont réhumectés par équilibre de potentiel à un pF très bas. Ils sont ensuite soumis à évaporation en conditions contrôlées. On mesure leur teneur en eau et leur densité après réhumectation et à différentes phases du dessèchement.

II. DESCRIPTION

1. Réhumectation des agrégats

- Les agrégats sont préparés par rupture des mottes séchées à l'air, puis tamisage entre les mailles de 3,15 mm et 2 mm, comme décrit dans la note "mesure de la densité texturale". L'obtention d'une courbe de retrait (une trentaine de points) nécessite une centaine de grammes d'agrégats.

- Ils sont ensuite étalés en une seule couche sur des morceaux de papier filtre sec et déposés dans le dispositif de réhumectation (Figure 1).

- Le niveau de l'eau permutée dégazée est établi à 3 cm sous le niveau de la plaque support (pF = 0, 48).

- On réalise ensuite le vide dans l'enceinte de réhumectation. Celle-ci doit être placée dans une pièce à température stable.

- On laisse ensuite les agrégats s'humecter pendant 4 jours.

2. Desséchement

- On prélève une partie des échantillons pour mesure de la limite de gonflement : mesure de la teneur en eau et de la densité en fin de réhumectation. Les autres sont regroupés au centre de l'enceinte de deshydratation de façon à former une multicouche uniforme.

- On extrait ensuite périodiquement 2 à 3 g d'agrégats que l'on met aussitôt dans un pèse filtre. Après chaque prélèvement, on regroupe les agrégats de façon à reformer une multicouche uniforme.

- Les pèse-filtres sont fermés et pesés. A la fin de l'évaporation, on mesure la densité et l'humidité des différents prélèvements d'agrégats.

III. POINTS DELICATS

1. Réhumectation

La mise sous vide des agrégats en réhumectation est destinée à éviter leur rupture par compression de l'air présent dans les pores. Pour qu'elle soit efficace, il faut éviter que les agrégats soient en contact avec l'eau à $pF = 0,5$ avant mise sous vide (rôle des papiers filtres secs, humidité initiale du tissu conducteur). Le vide n'est important que dans la phase initiale de l'humectation. Il n'est pas nécessaire de maintenir le vide pendant toute la durée de l'opération.

La durée d'équilibre recommandée est surtout importante dans le cas des matériaux argileux. Elle peut être réduite pour des textures plus grossières.

2. Desséchement

La vitesse d'évaporation, et par conséquent la périodicité des prélèvements dépend des caractéristiques de l'enceinte d'évaporation et de la température du laboratoire. On ne peut donc fournir de règle générale quant aux temps de prélèvement. Ceux-ci sont par ailleurs fonction du matériau (amplitude de la gamme de teneurs en eau à étudier) et du nombre de points souhaités.

IV CONDITIONS D'UTILISATION - LIMITES

1. Réhumectation

Certains agrégats pauvres en argile sont extrêmement fragiles à l'état de gonflement potentiel. Il peut être impossible de déterminer leur densité. On se limitera alors à une mesure de teneur en eau. On admettra qu'ils sont saturés pour calculer leur densité à partir de l'équation de la droite de saturation.

Un point essentiel concerne les conditions de réhumectation. Il est clair que ces conditions de gonflement sans limitations mécaniques et sous vide sont différentes des conditions réalisées in-situ. La valeur du gonflement potentiel obtenu doit être considérée comme le résultat d'un test et non comme une mesure représentative du comportement en place.

2. Desséchement

Le desséchement par évaporation présente l'avantage de fournir rapidement un nombre de points élevé pour établir la courbe de retrait.

Ceci est difficilement possible en réalisant le desséchement par équilibres de potentiel successifs avec le matériel traditionnel d'extraction d'eau.

L'expérience nous a montré que les valeurs de densité obtenues à une teneur en eau donnée avec chacune des deux techniques ne différaient pas systématiquement. On peut les utiliser complémentaires afin d'établir la relation entre gonflement et potentiel de l'eau.

3. Mesure de densité

Les limites propres à la mesure de densité sur agrégats (v. note "Mesure de la densité texturale") s'appliquent évidemment au cas présent.

4. Durée

La durée totale de l'opération est de cinq à six jours, du fait des temps de réhumectation et de séchage. Le temps de travail effectif est plus réduit et ne peut être évalué que grossièrement. Il est de l'ordre d'une journée de travail pour une courbe de retrait comportant une trentaine de points.

D'après séminaire CEE Agrimed 14-18 mars 1983
"Fragmentation par fissuration"
P. STENGEL

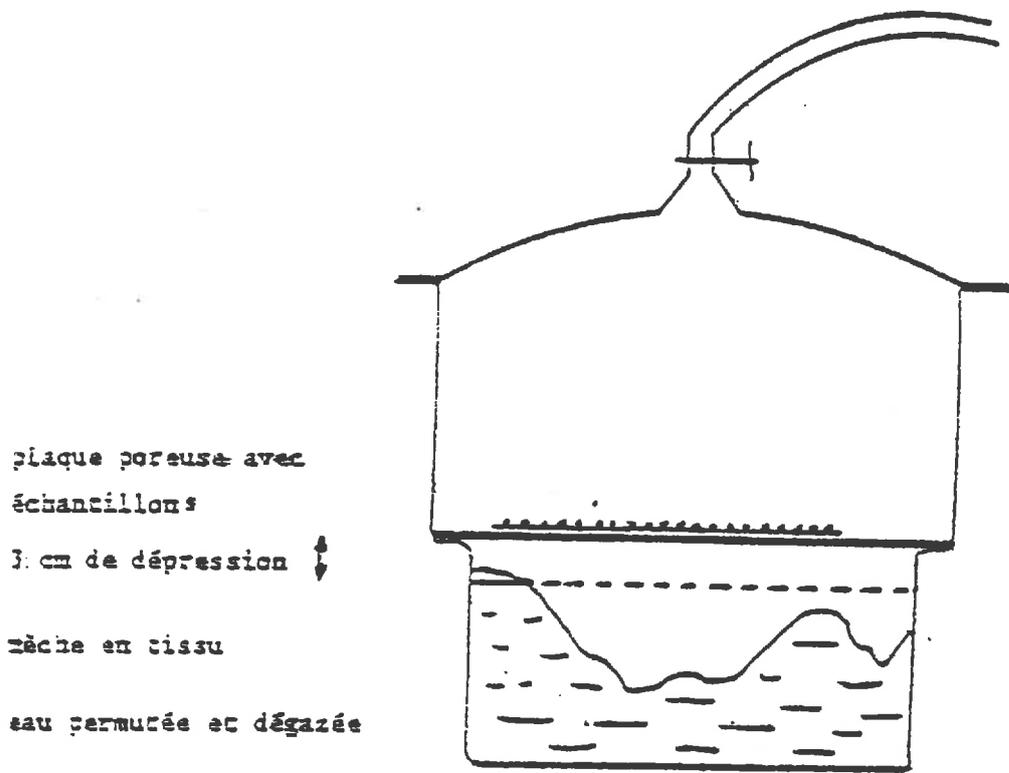


FIG. 1 Dispositif d'humectation

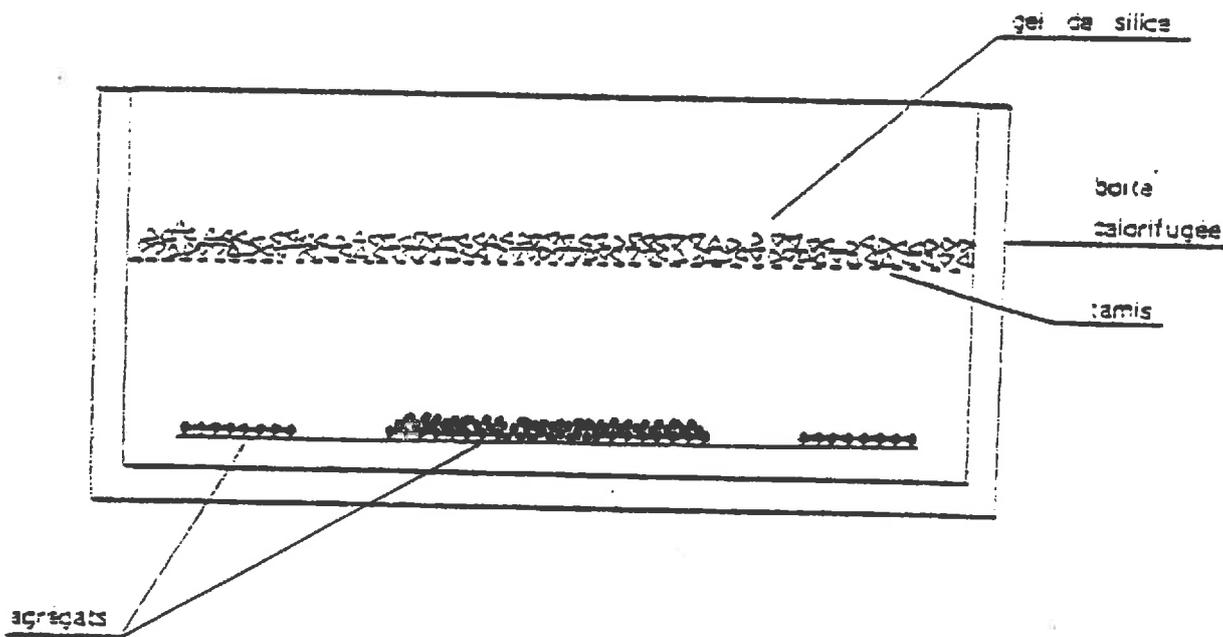


FIG. 2 Dispositif de séchage

ANNEXE 2

MODE DE PREPARATION DES AGREGATS REMANIES

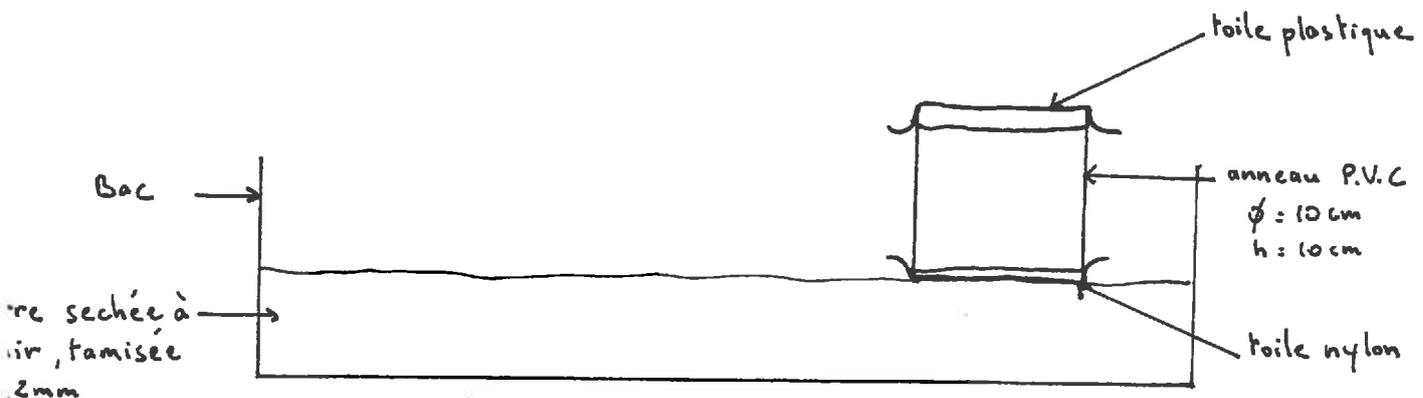
Pour chaque échantillon, de la terre sèche à l'air est broyée mécaniquement et tamisée à 2 mm (tamis à mailles rondes) puis malaxée à une teneur en eau voisine de 1,9 fois l'humidité équivalente. Suivant les échantillons 2 conduites sont alors observées :

- Pour Boigneville, Les Limons des Vignères et St Paul

On laisse la terre s'imprégner 3 à 4 jours puis on ajuste la teneur en eau pour obtenir après malaxage une pâte homogène. Le ressuyage (24 heures) est provoqué par la mise en contact de la pâte initiale avec une quantité suffisante du même sol séché à l'air. Il est suivi d'un séchage à l'air puis à l'étuve (55° C) (J.C. FIES et P. STENGEL, 1981 : Histoire hydrique modulée).

- Pour les Vignères

L'imprégnation des micro-agrégats très argileux étant très lente, on laisse la terre s'imprégner pendant quelques jours puis on remplit (environ au 3/4) des pots de 3 litres qui sont secoués mécaniquement pendant 3 fois 30 minutes. Entre chaque passage sur la secoueuse, on ajuste la teneur en eau pour obtenir une pâte homogène, facile à malaxer et on laisse reposer pour obtenir une bonne imprégnation. Le ressuyage (qui dure environ 15 jours) s'effectue de la même manière que précédemment.



Les pâtes obtenues sont broyées manuellement et tamisées entre 3,15 et 5 mm dans un tamis à mailles carrées comme en I₁

ANNEXE 3

MESURE DE LA RESISTANCE A L'ECRASEMENT

ET DU DIAMETRE DES AGREGATS

1. Appareil de mesure (Cf. schéma)

Nous utilisons une presse à compression simple construite au laboratoire. Elle est constituée de 4 parties :

- Un moteur électrique Monoperm 6V à 2 vitesses :
 - . L'une, lente permet la mesure de la résistance à l'écrasement
 - . L'autre, rapide permet une approche de l'agrégat avant et après la mesure.
- Un raccord coulissant transforme le mouvement de rotation du moteur en un mouvement de translation qui est transmis à la vis micrométrique.
- Une vis micrométrique permet de faire varier la distance (d) qui est lue en (a) sur un curseur. Pour la vitesse lente du moteur, la vitesse d'avancement de la vis est de 2,6 mm/mh.
- Un capteur de force relié à une lecture graphique.

Le tout est fixé sur un bâti.

2. Mesure du diamètre et de la résistance à l'écrasement

Chaque agrégat est posé sur le plateau du capteur de force (b). Le diamètre est mesuré dès que l'extrémité de la vis micrométrique est au contact de l'agrégat (ce qui correspond au début de l'augmentation de la force enregistrée par le capteur).

La force augmente (de part l'avancement de la vis micrométrique) jusqu'à la rupture qui correspond à une brusque diminution de la force. Graphiquement, la résistance à l'écrasement correspondra au maximum d'un pic (Cf. courbes de rupture).

3. Le contrôle des variations d'humidité en cours de mesure

3.1 Pour des agrégats secs à l'étuve

Les agrégats séchés 24 heures à 105° C sont déposés dans un pèse filtre fermé, lui-même dans un dessiccateur. Toutes les 10 mesures, 10 agrégats sont transférés du pèse filtre dans une coupelle, toujours dans le dessiccateur. Pour chaque mesure, on ouvre le dessiccateur, on prélève un agrégat de la coupelle et on referme aussitôt le dessiccateur.

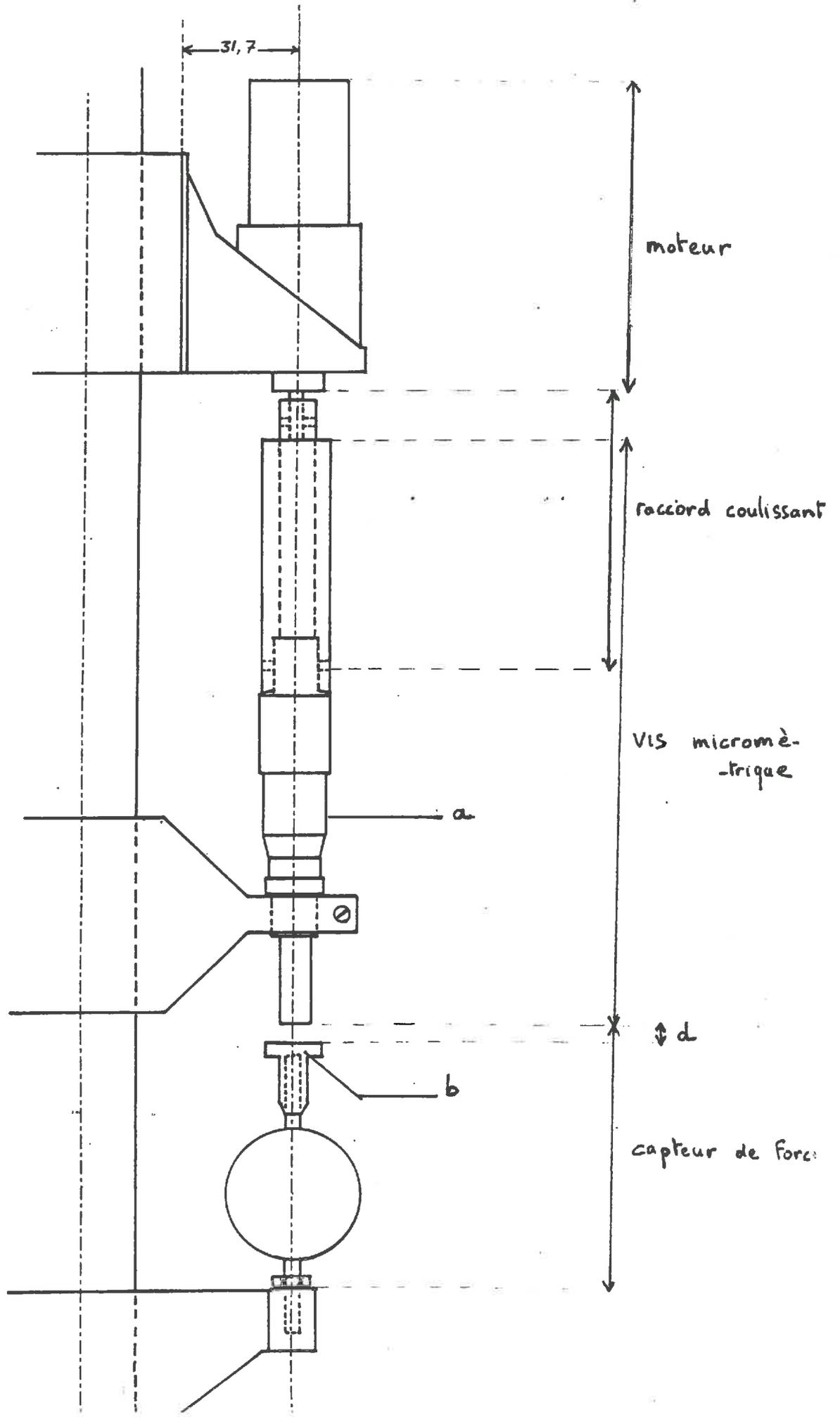
On contrôle que les variations d'humidités sont inférieures à 0,1 % pour 60 mesures.

3.2 Pour des agrégats humides

Les agrégats sont portés à un potentiel donné dans une presse de Richards. Pour chaque sol, les agrégats sont répartis, à la sortie de la presse dans 15 pèse filtres de façon à avoir 50 à 100 agrégats par pèse filtre. La mesure est effectuée en prélevant 4 à 5 agrégats par pèse filtre.

On obtient ainsi des amplitudes maximales de 0,7 % d'humidité pour des teneurs initiales de 10 à 18 % soit des erreurs relatives de 4 à 7 %. Les pics de rupture obtenus sont plus difficiles à lire (Cf. Courbes de rupture).

PRESSE A COMPRESSION SIMPLE
(Mesure du diamètre et de la résistance à l'écrasement)

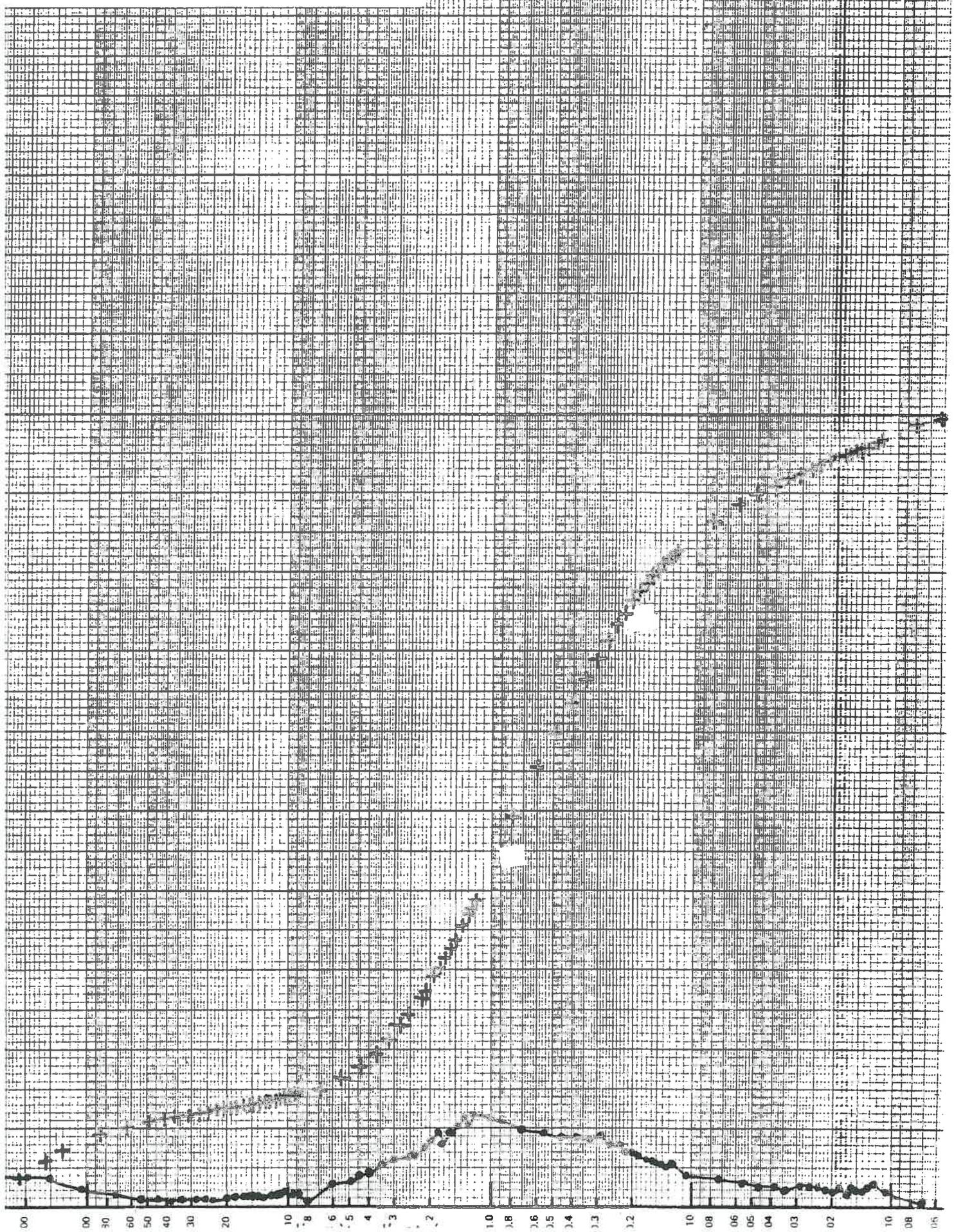


Annexe 4 : Courbes de porosimétrie à Mercure

11 on limon surface

1.368

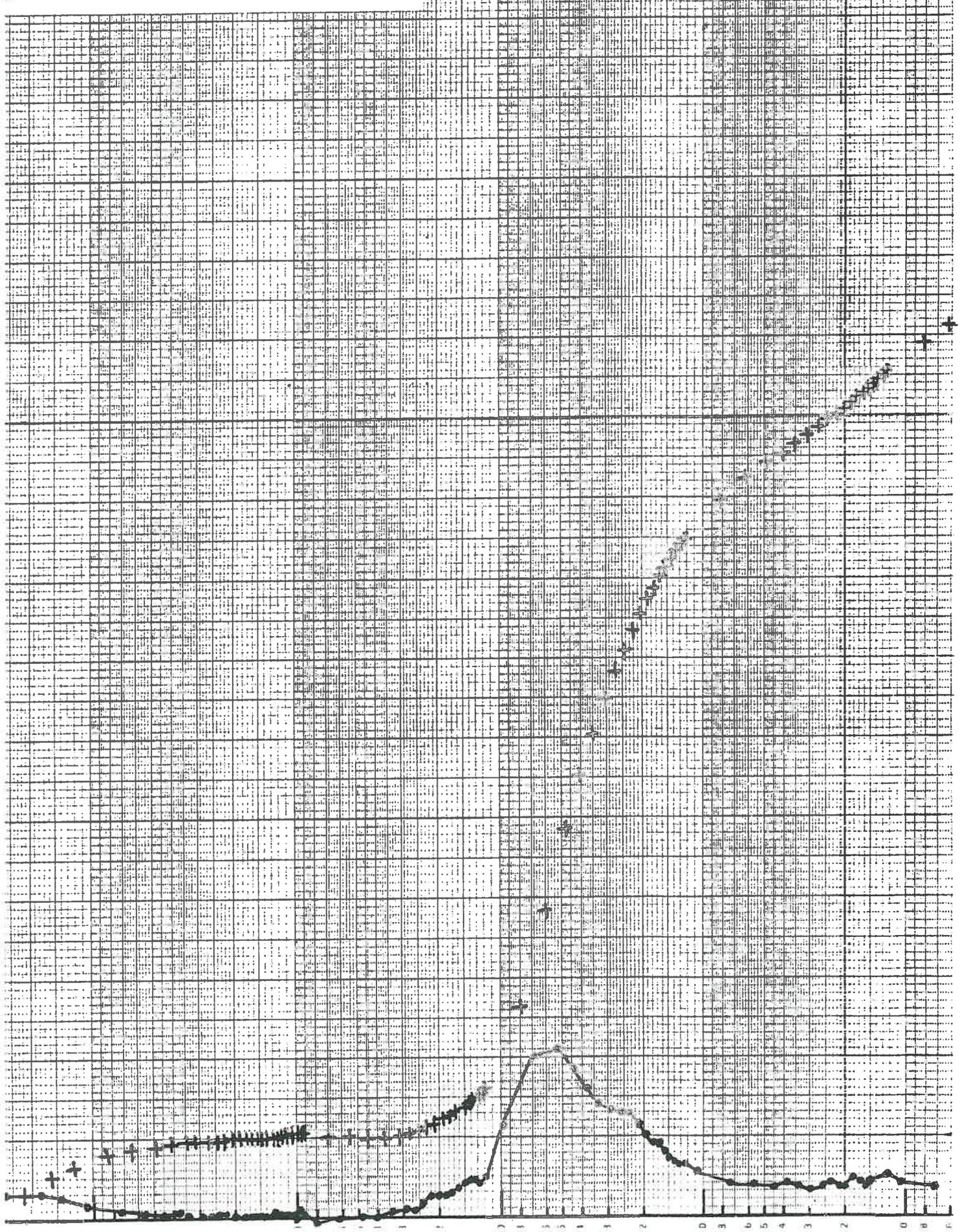
260785 par PRGM



Ion limon fond (Type "R")

0.548

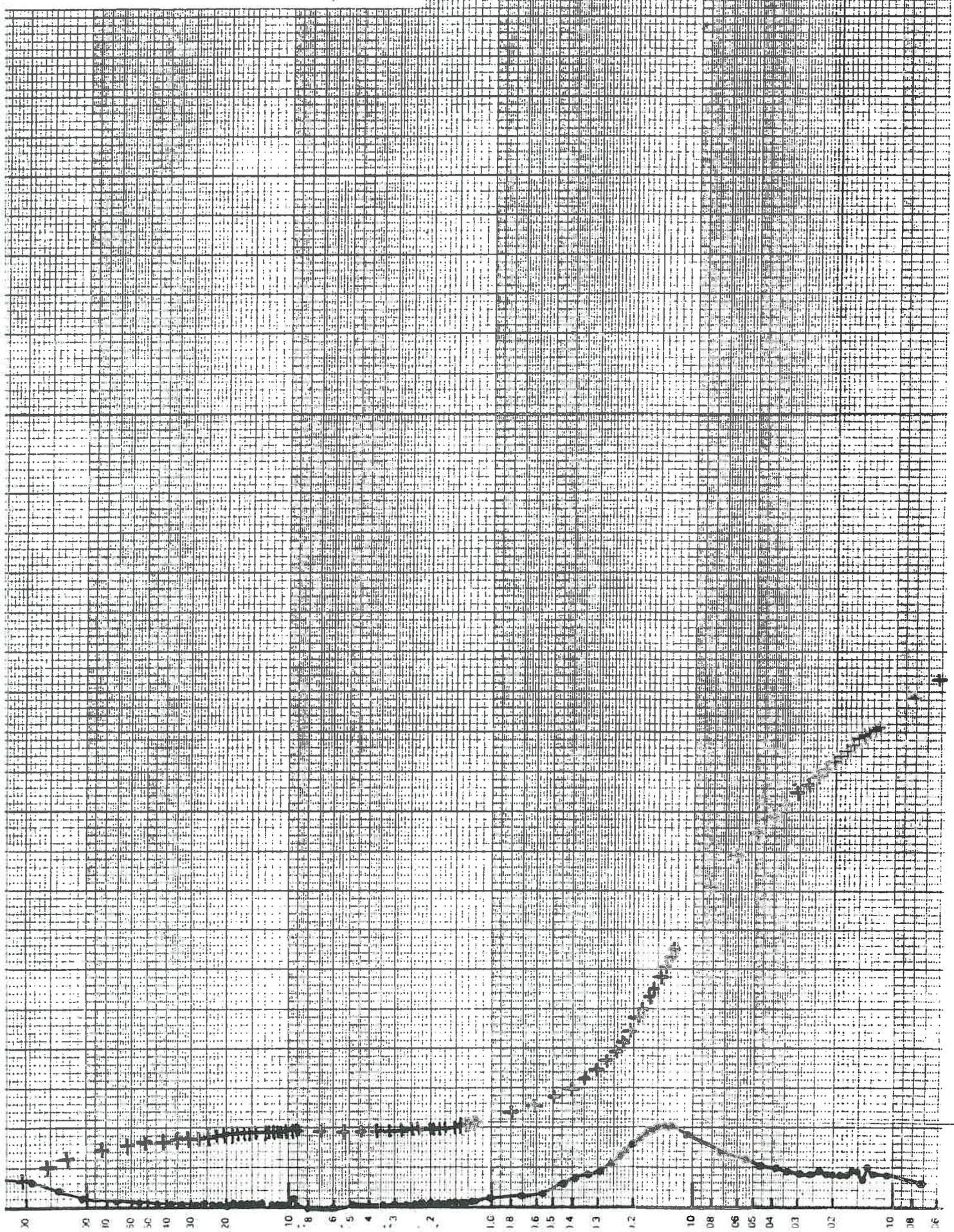
31 07 85 par PRGM



Mon vignères 0-20

1.840

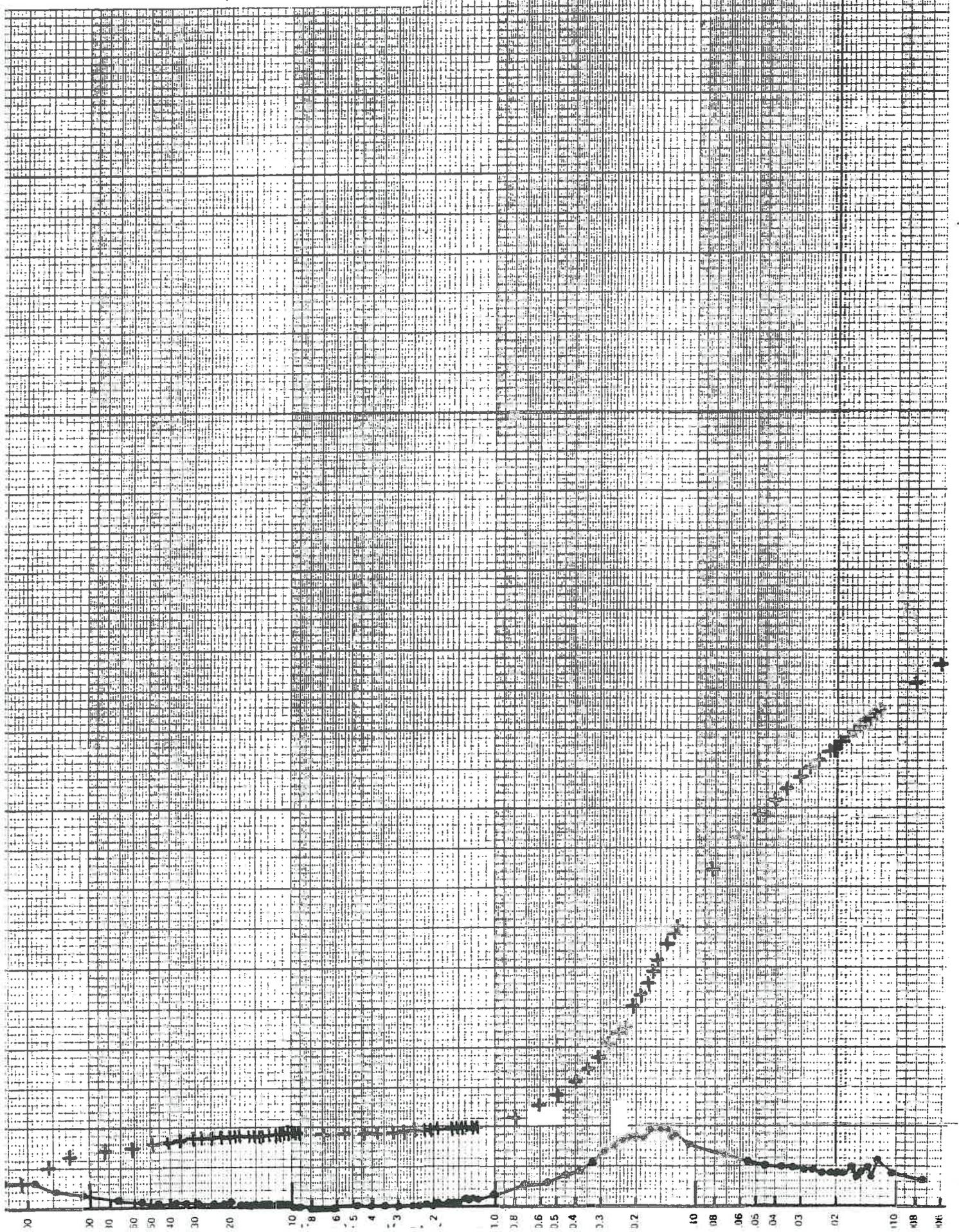
23 07 85 par PRGM



10n VIGNERES 20-40

1.833

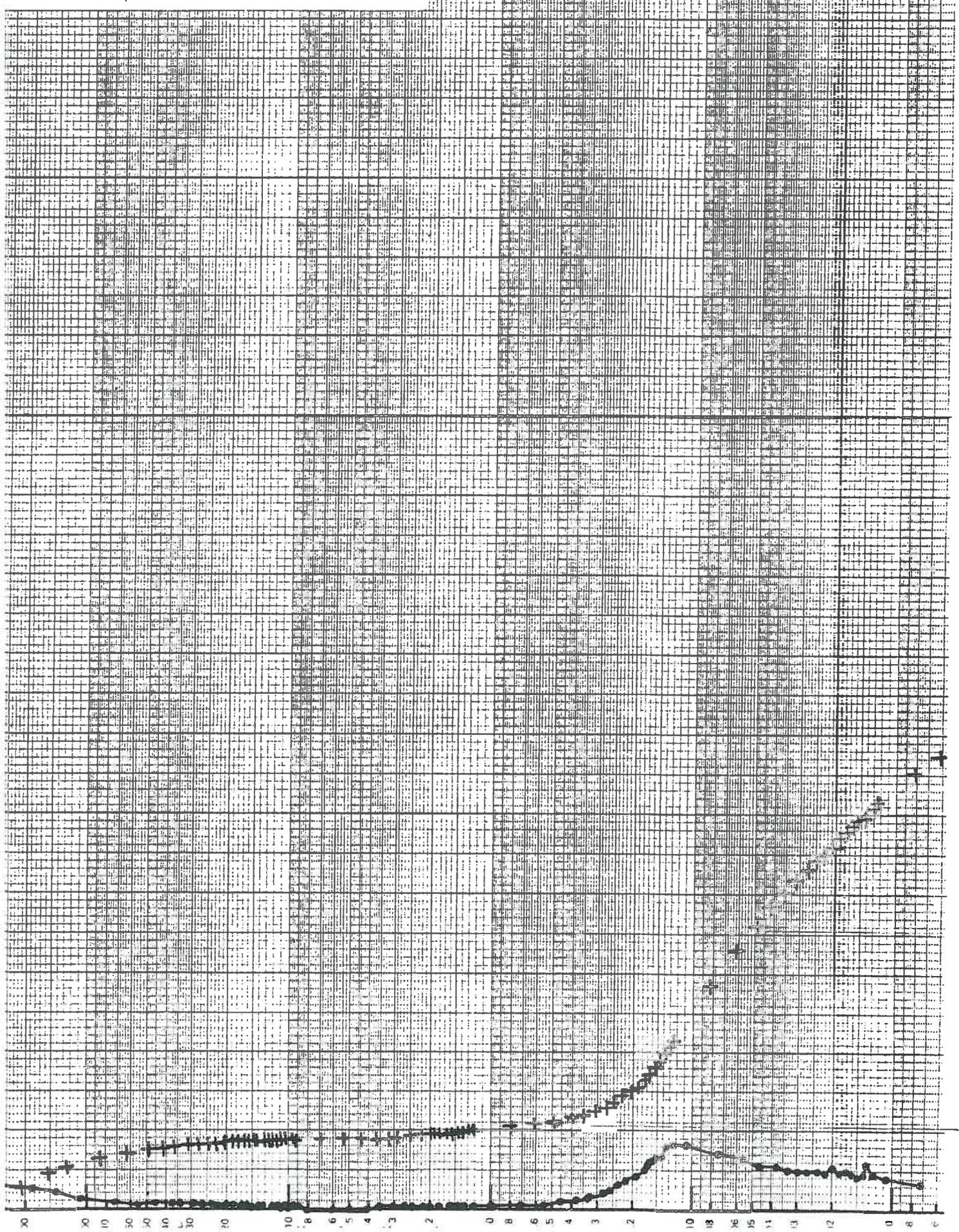
24 07 85 par PRGM



illon Vignères 40-60

2.356

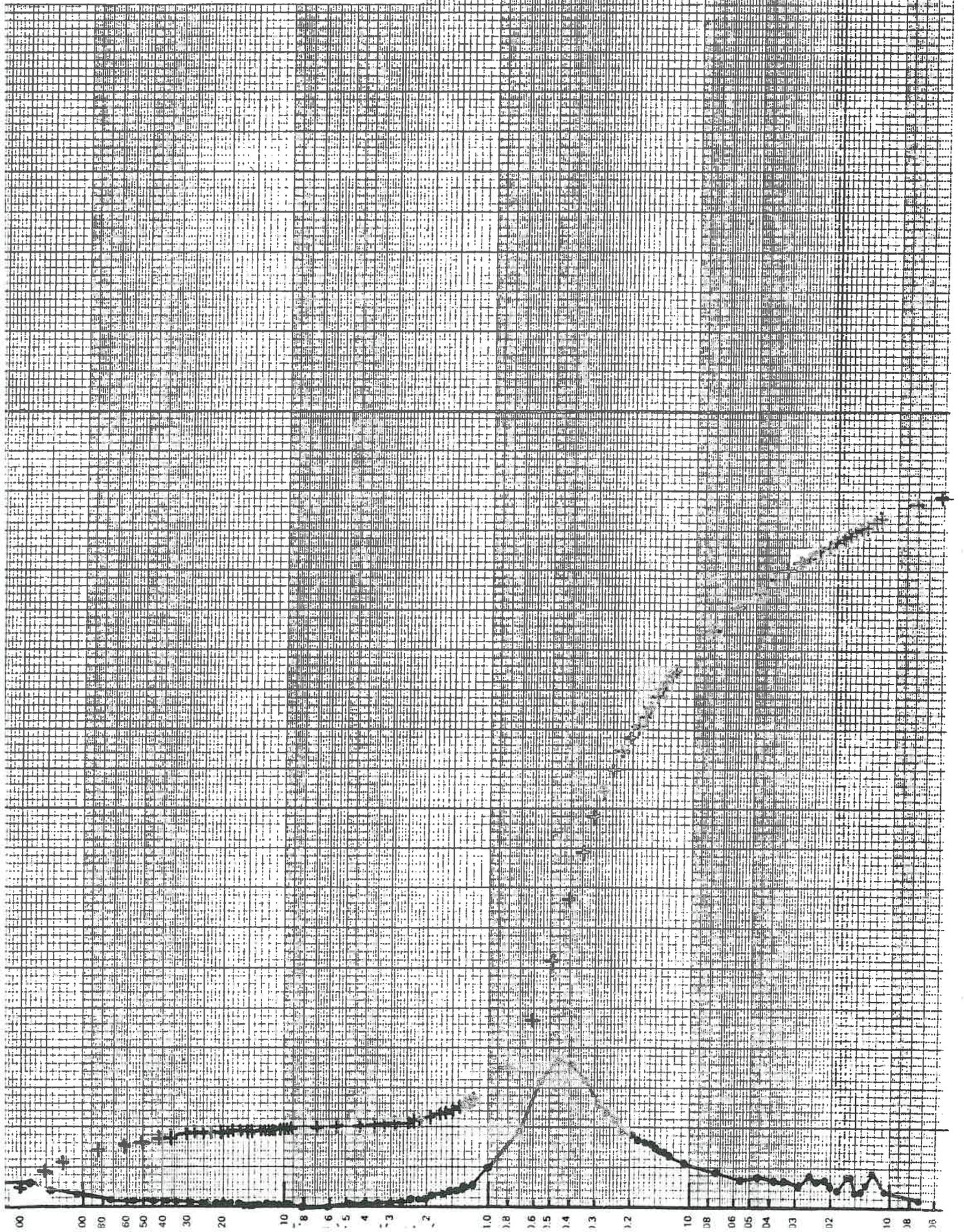
25 07 85 par PRGM



Ilon Saint Paul 0-20

1.860

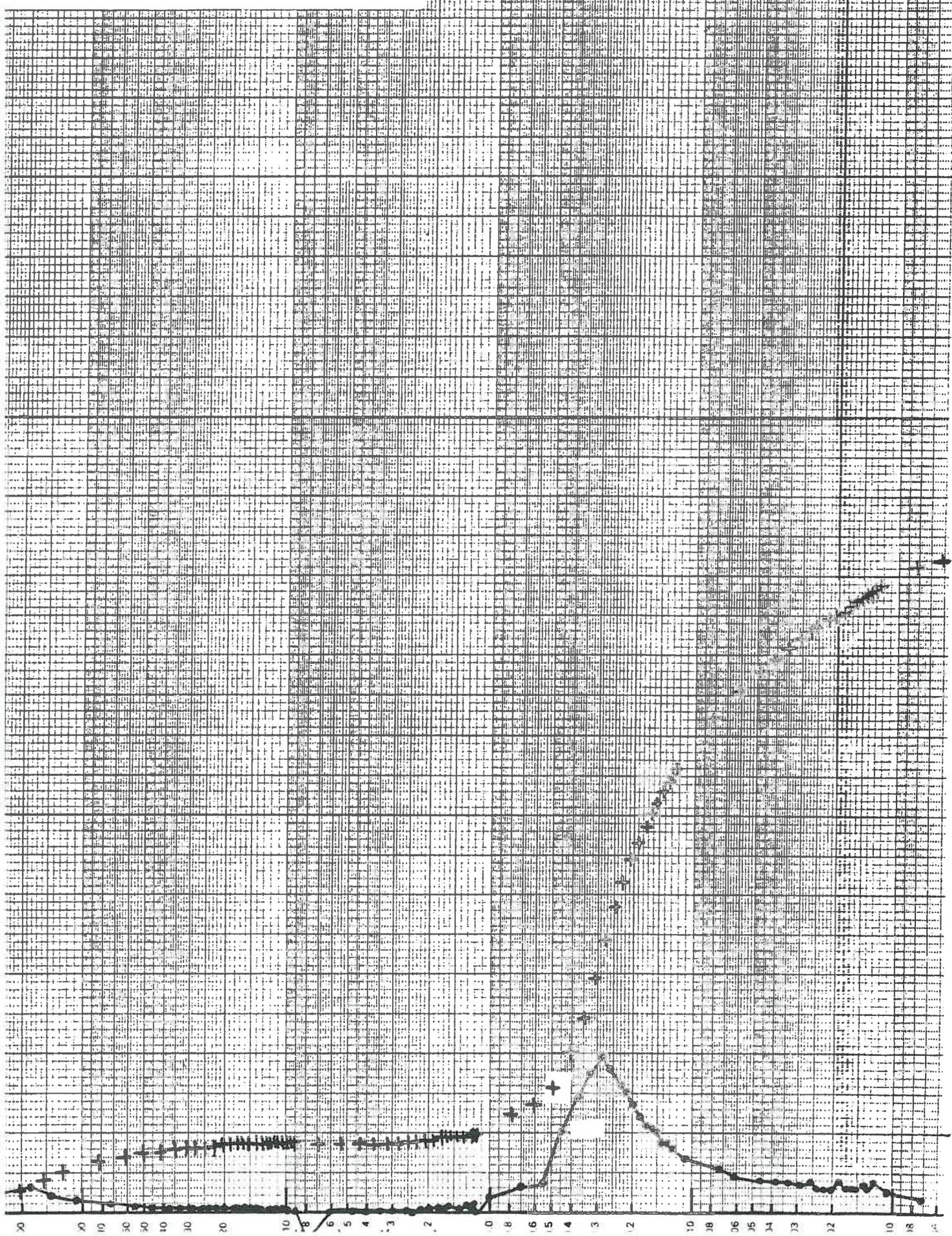
19 07 85 par PRGM



Ilon Saint Paul 40-60

1.730

22 07 85 par PRGM



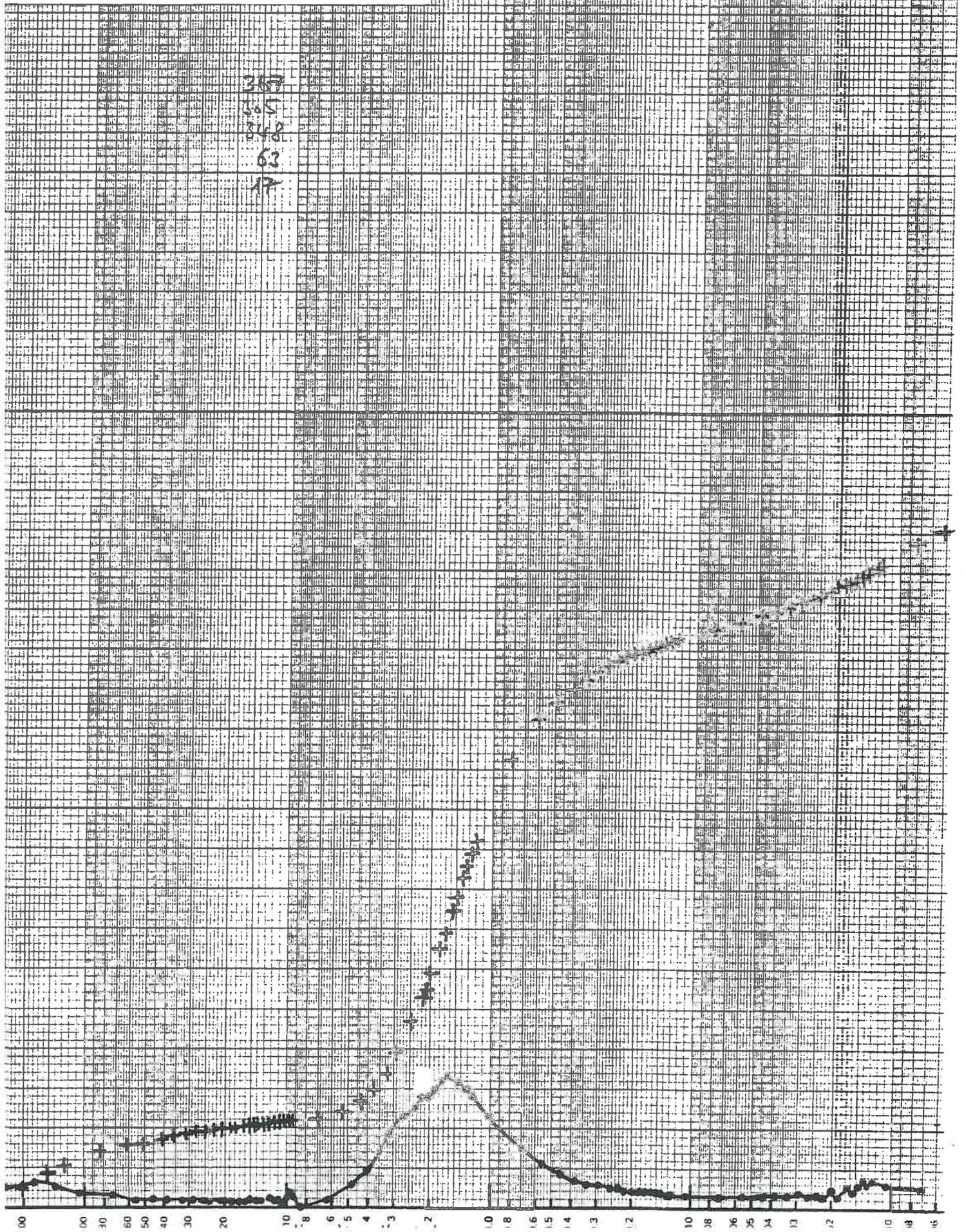
illon Boigneville LZ

1.763

170785

par PRGM

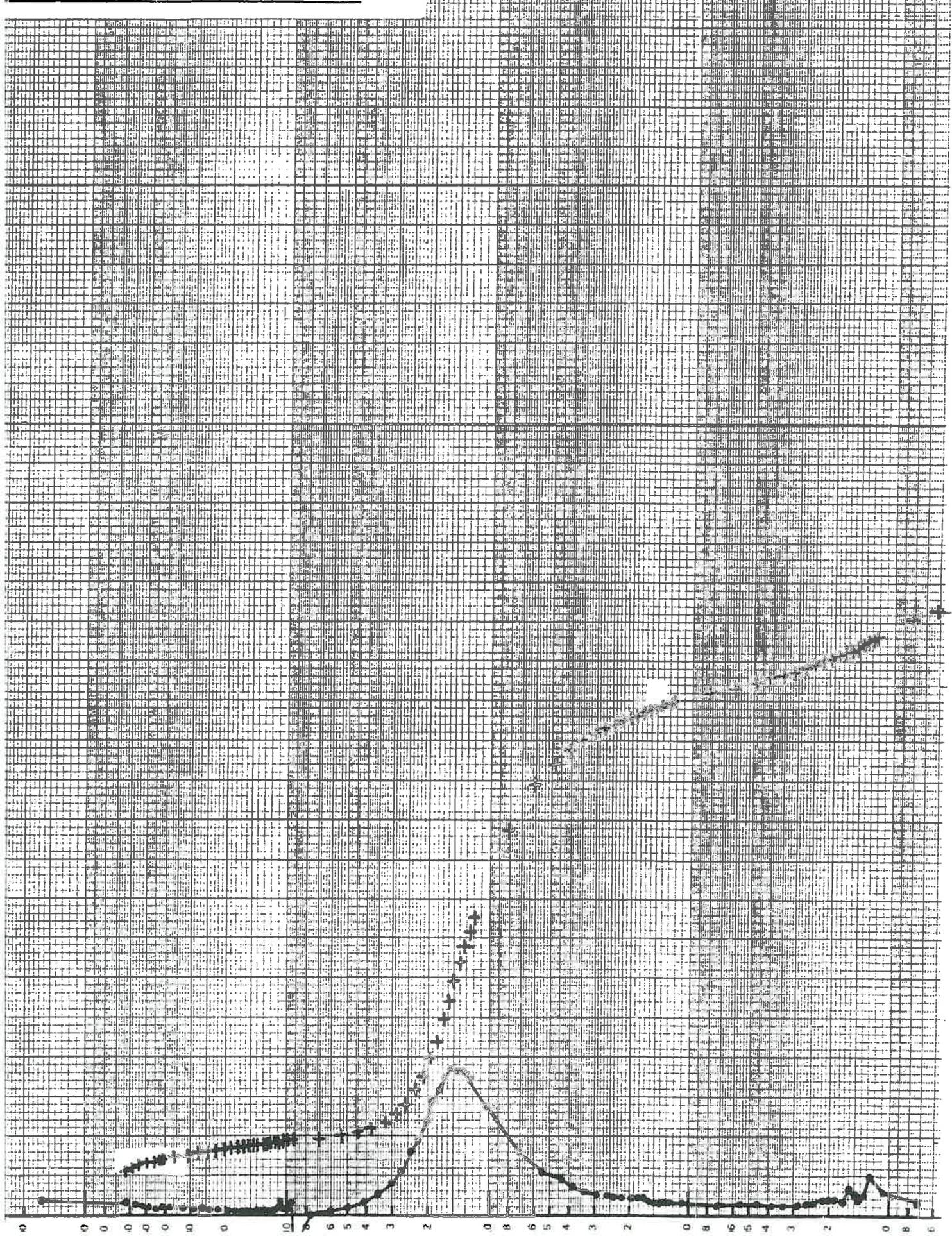
387
365
848
63
17



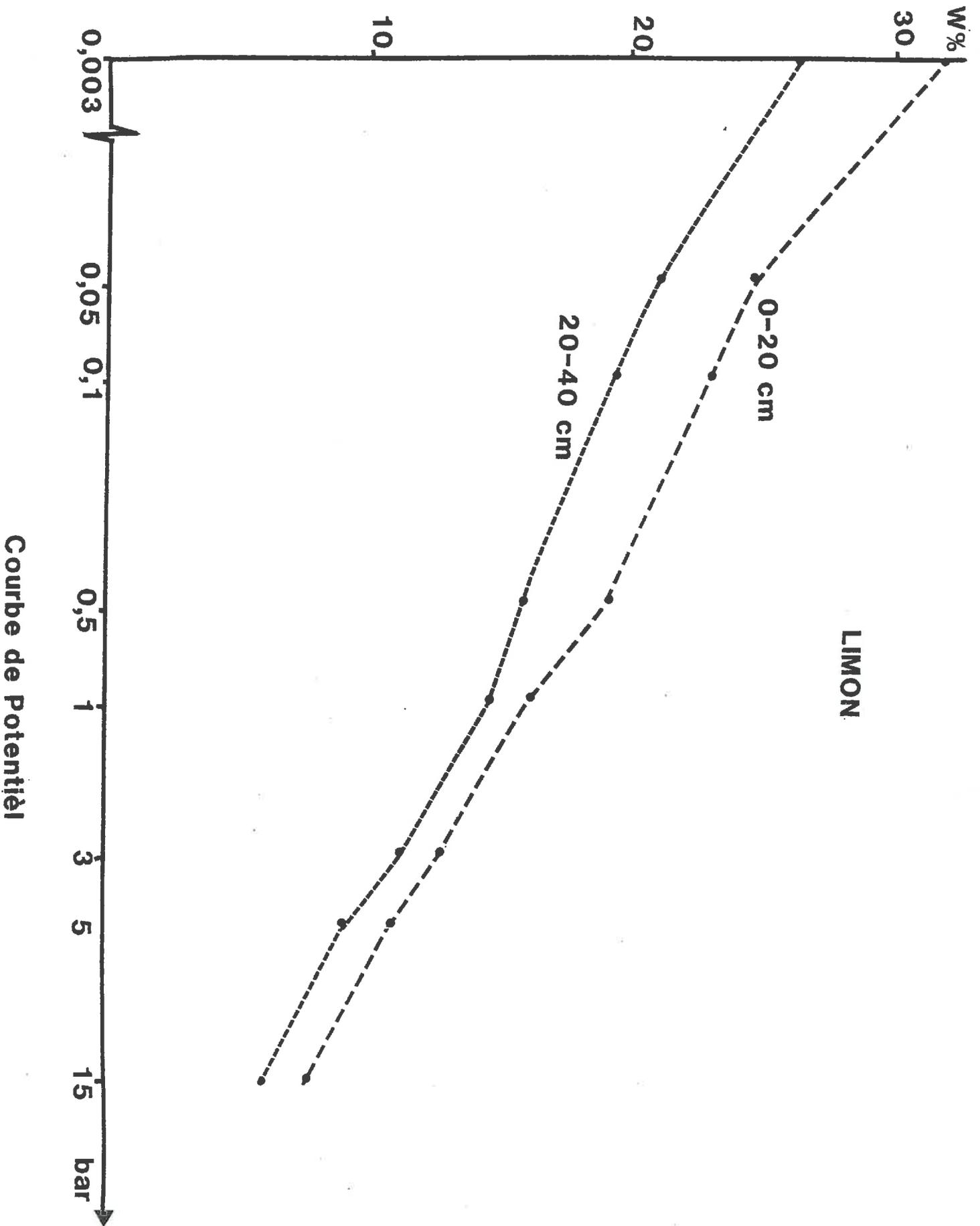
11on Boigneville L0

1.871

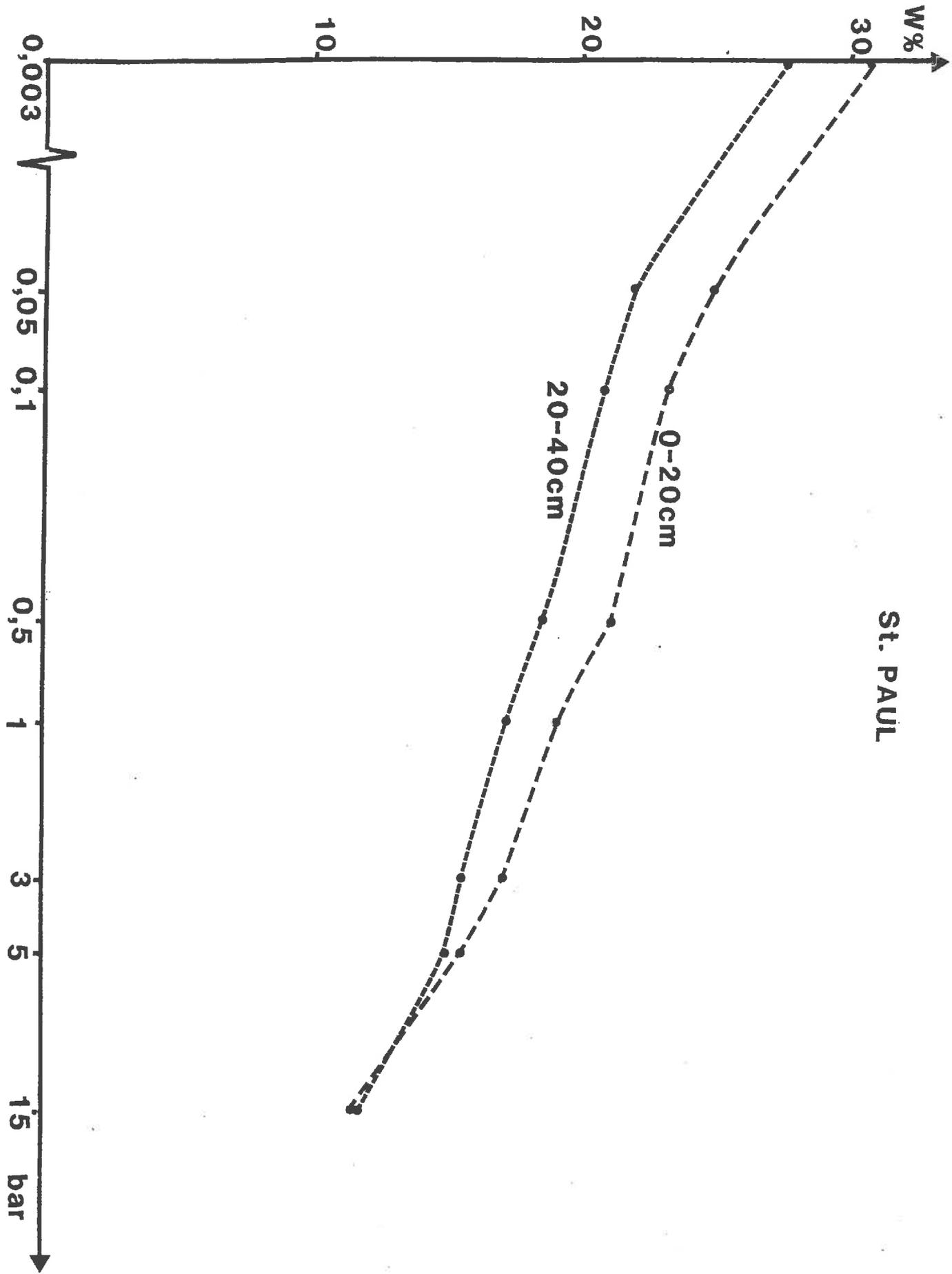
8 07 85 par PRGM



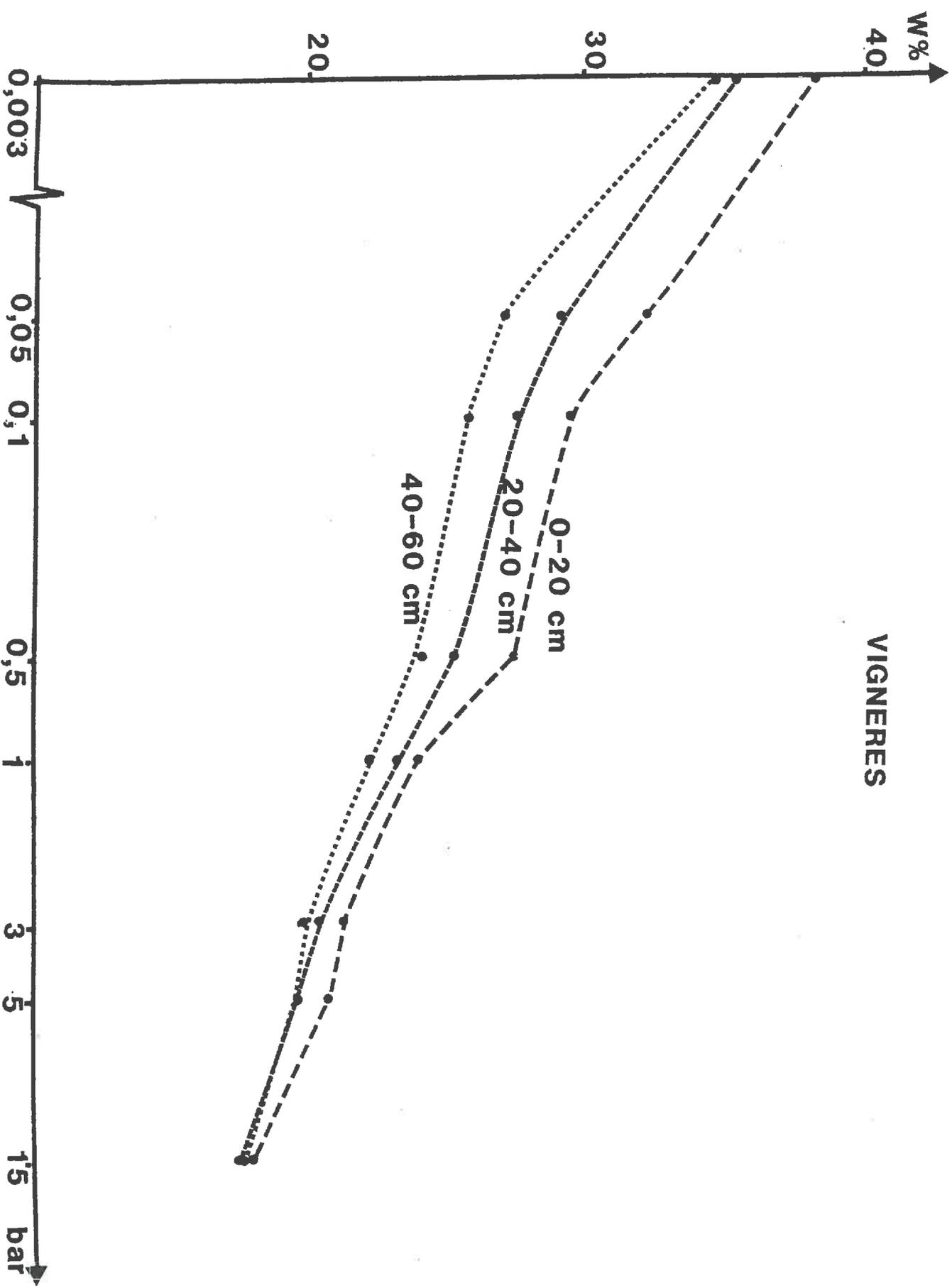
Annexe 5 : Courbes de potentiel



St. PAUL



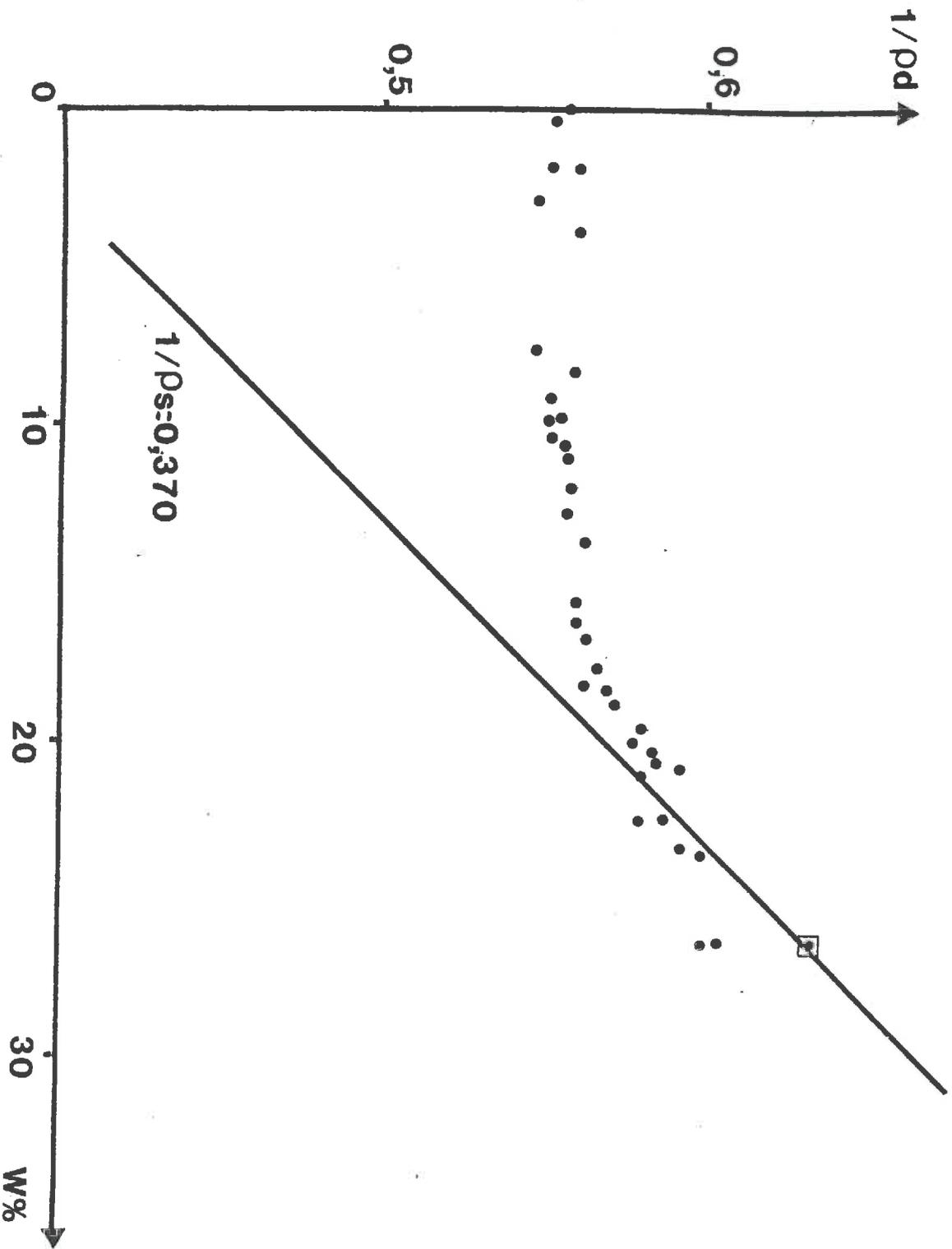
VIGNERES



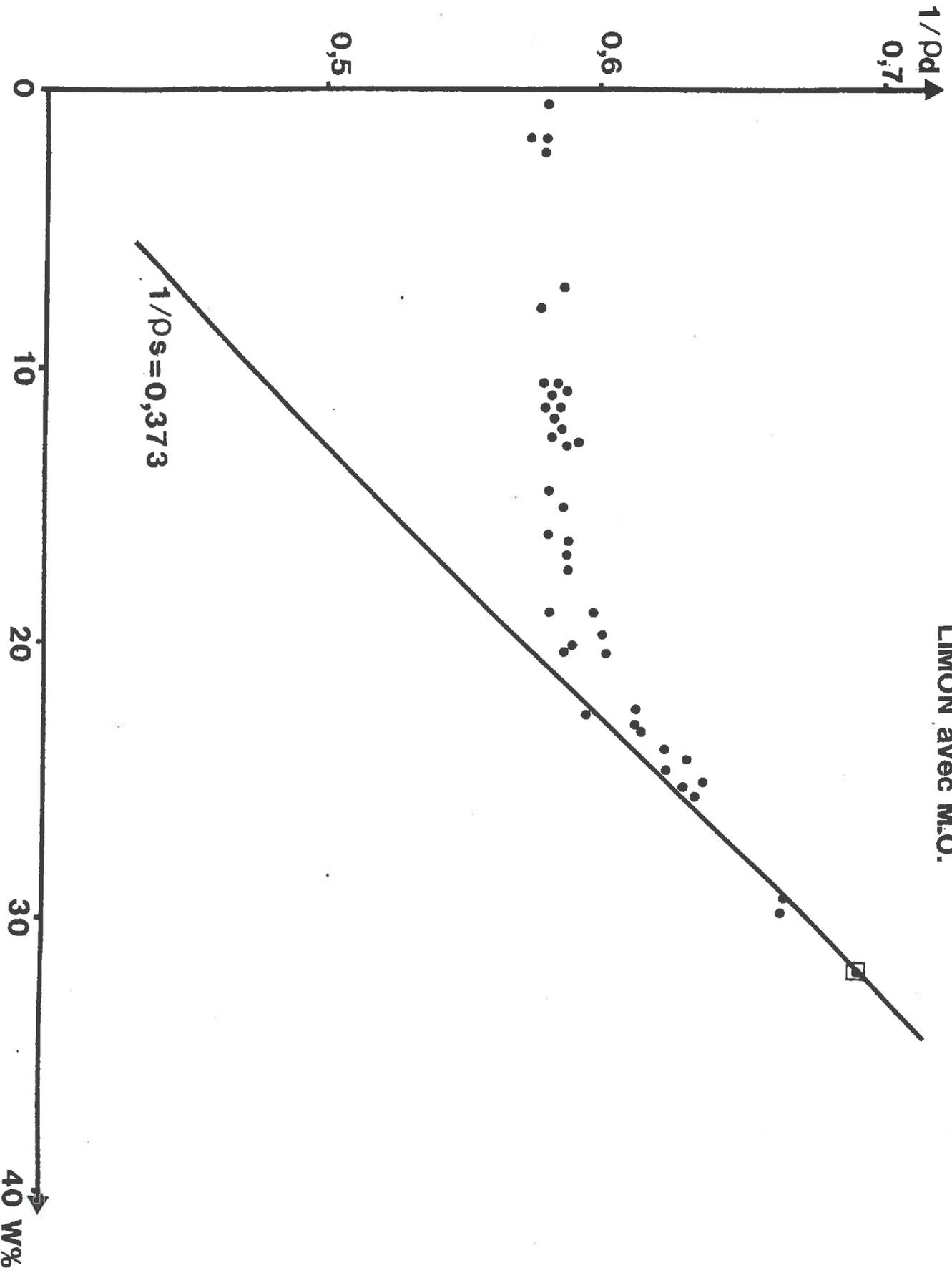
Courbe de Potentiel

Annexe 6 : Courbes de gonflement-retrait

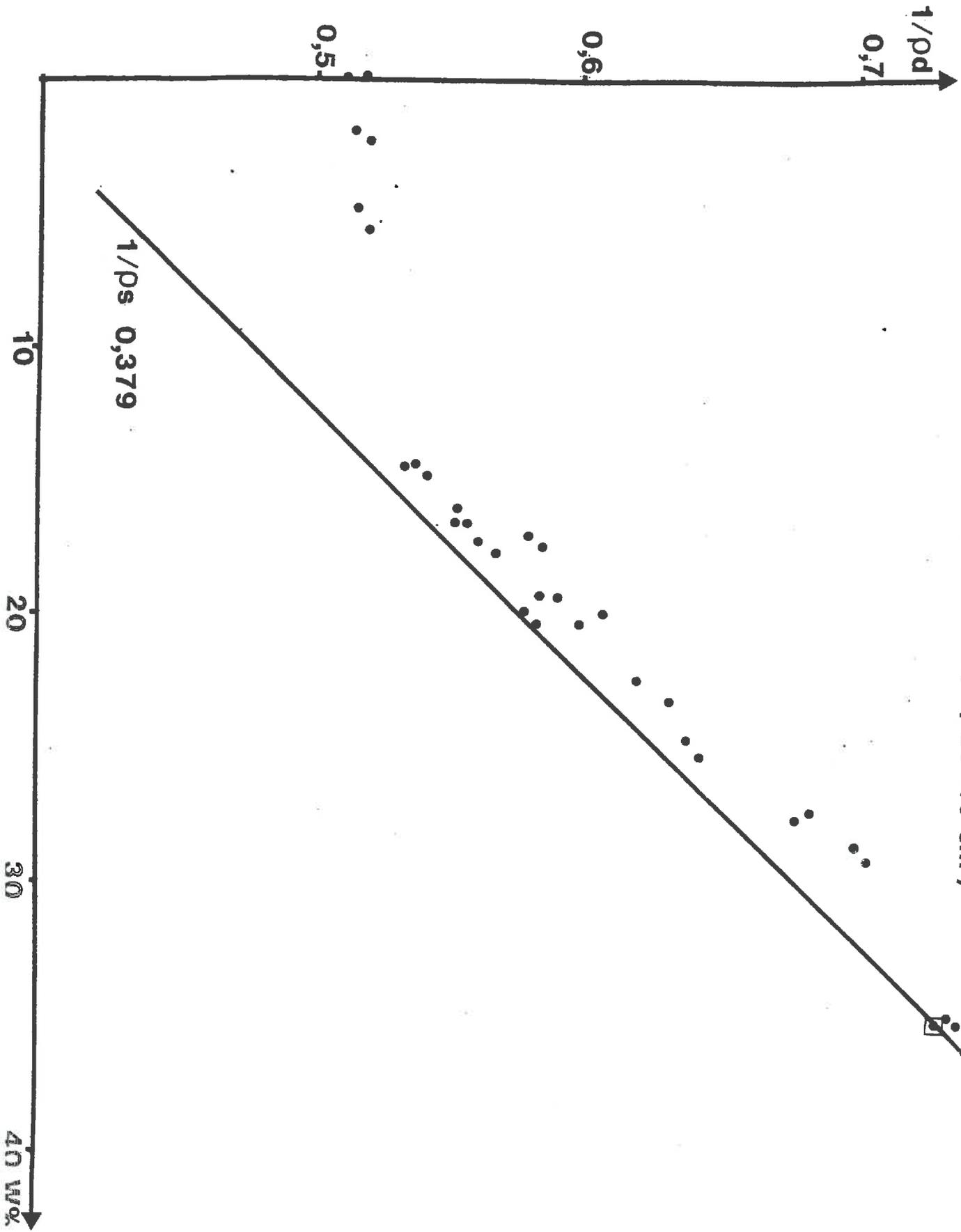
LIMON sans M.O.



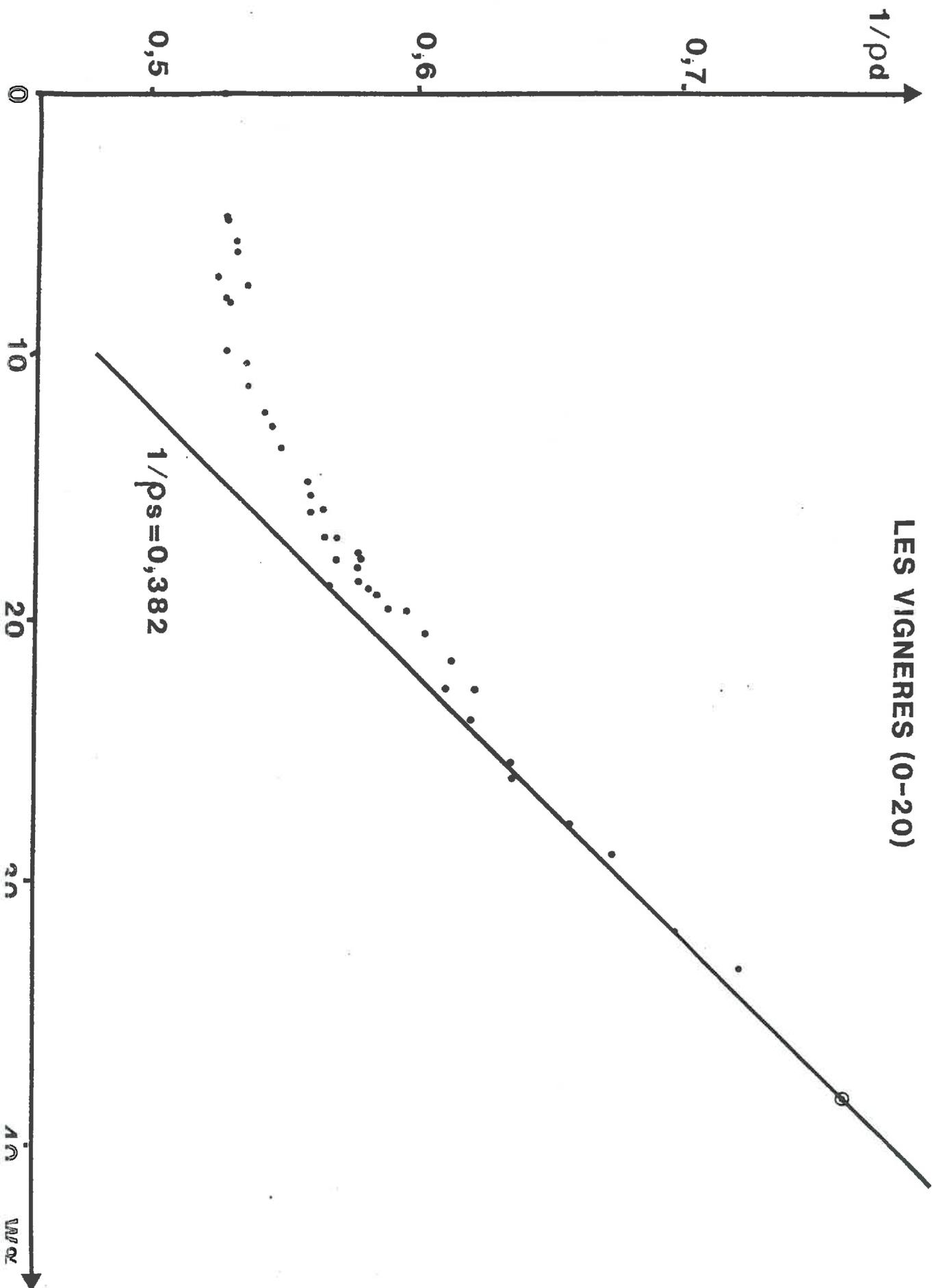
LIMON avec M.O.



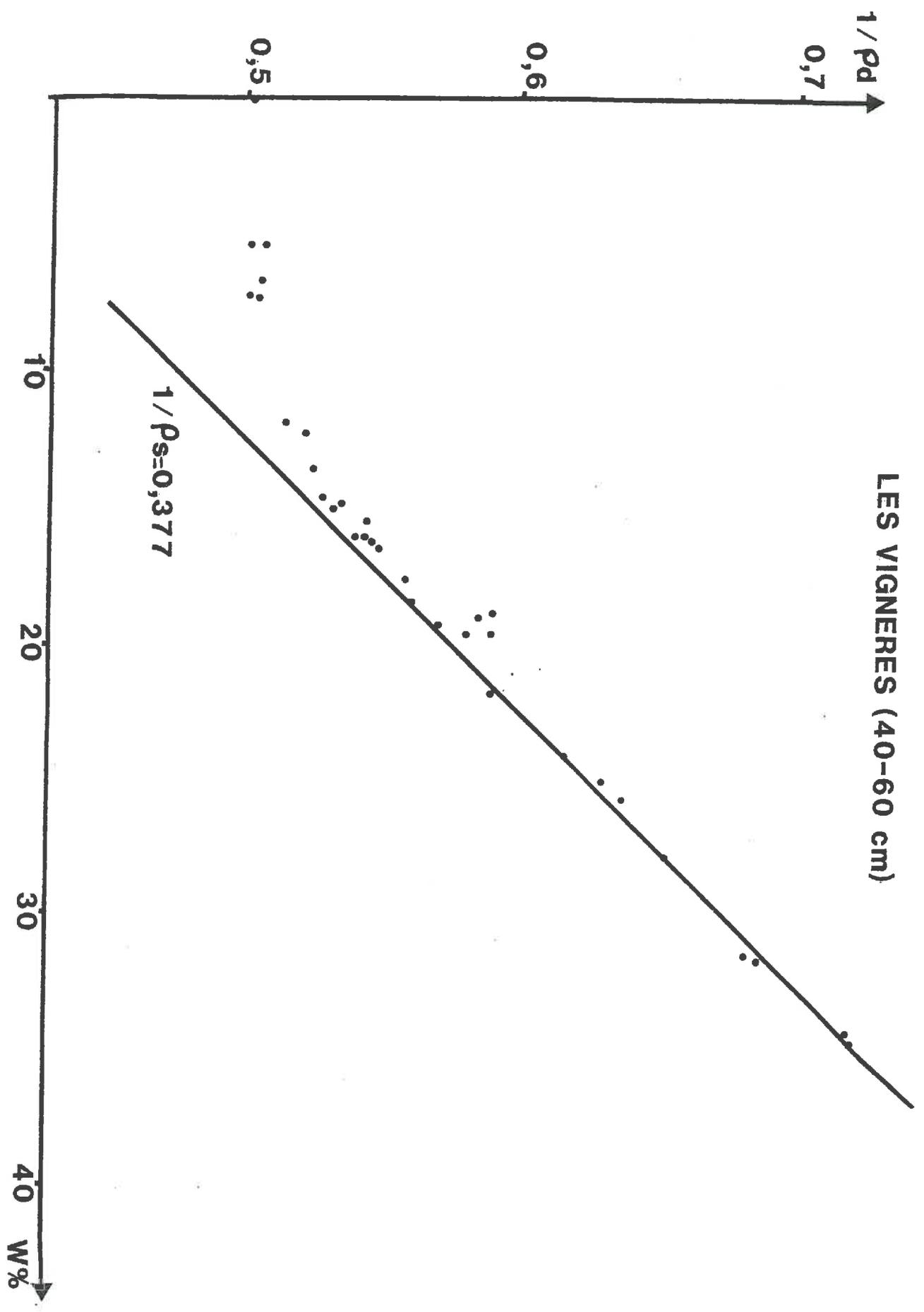
LES VIGNERES (20-40 cm)



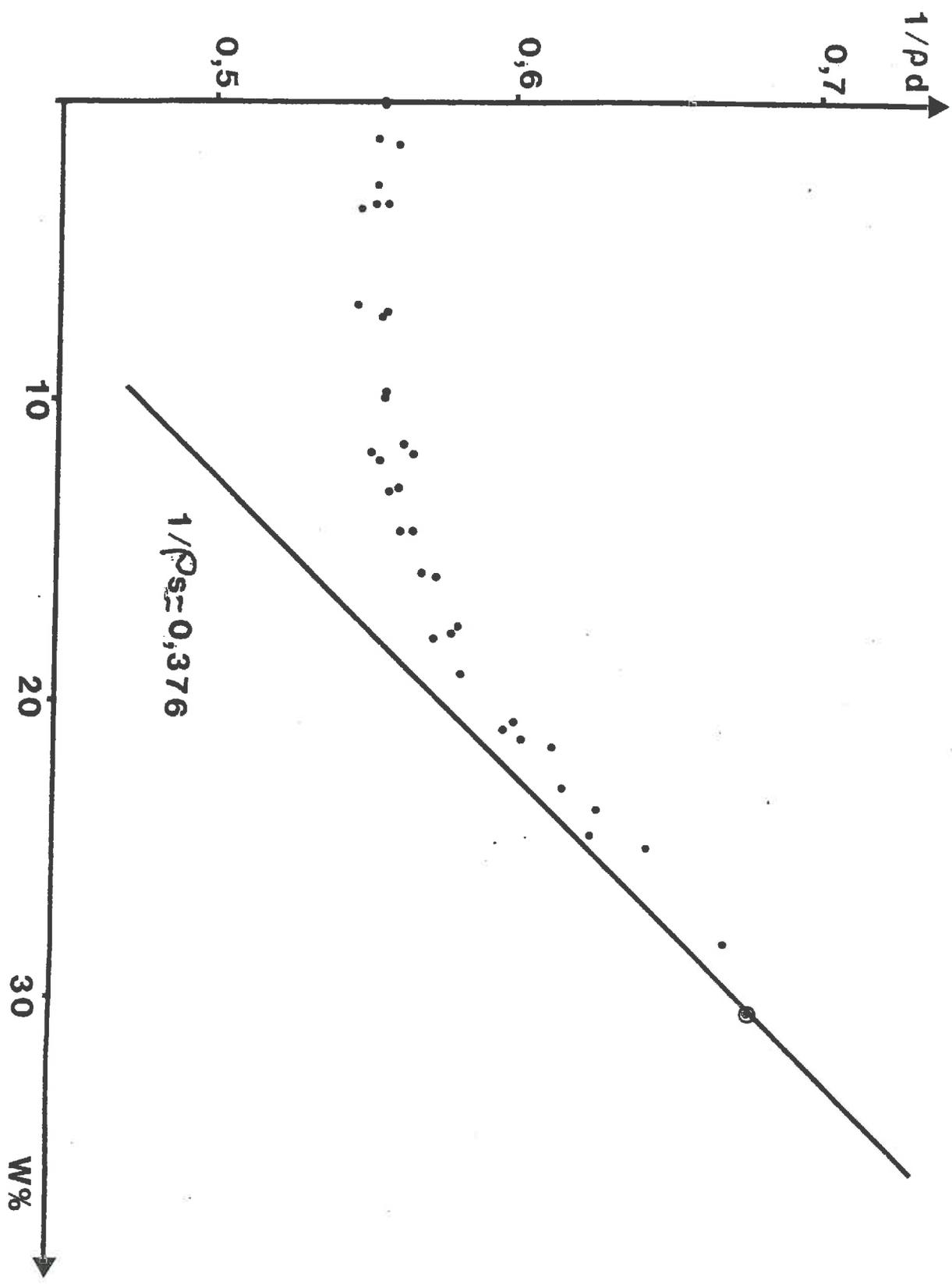
LES VIGNERES (0-20)



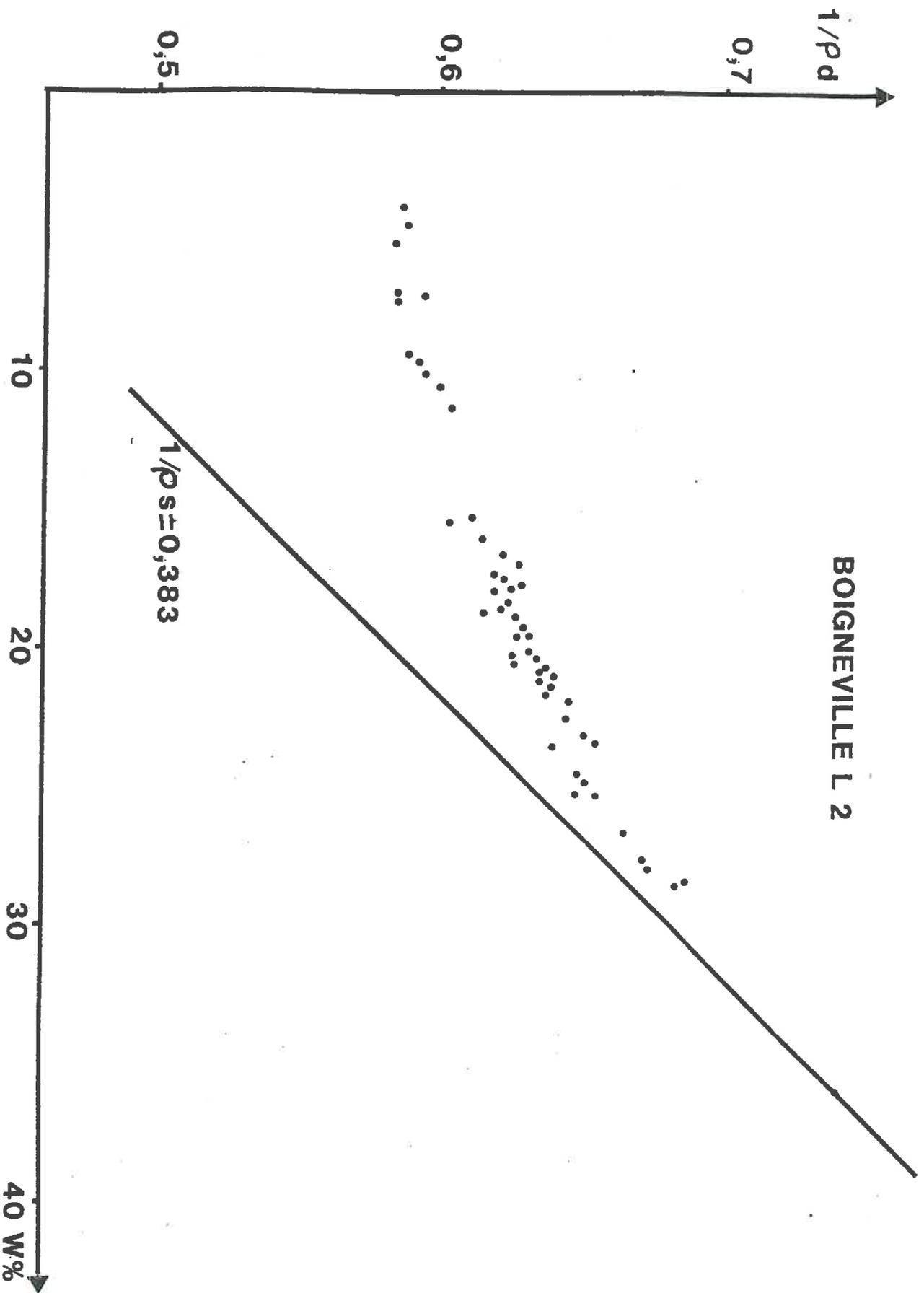
LES VIGNERES (40-60 cm)



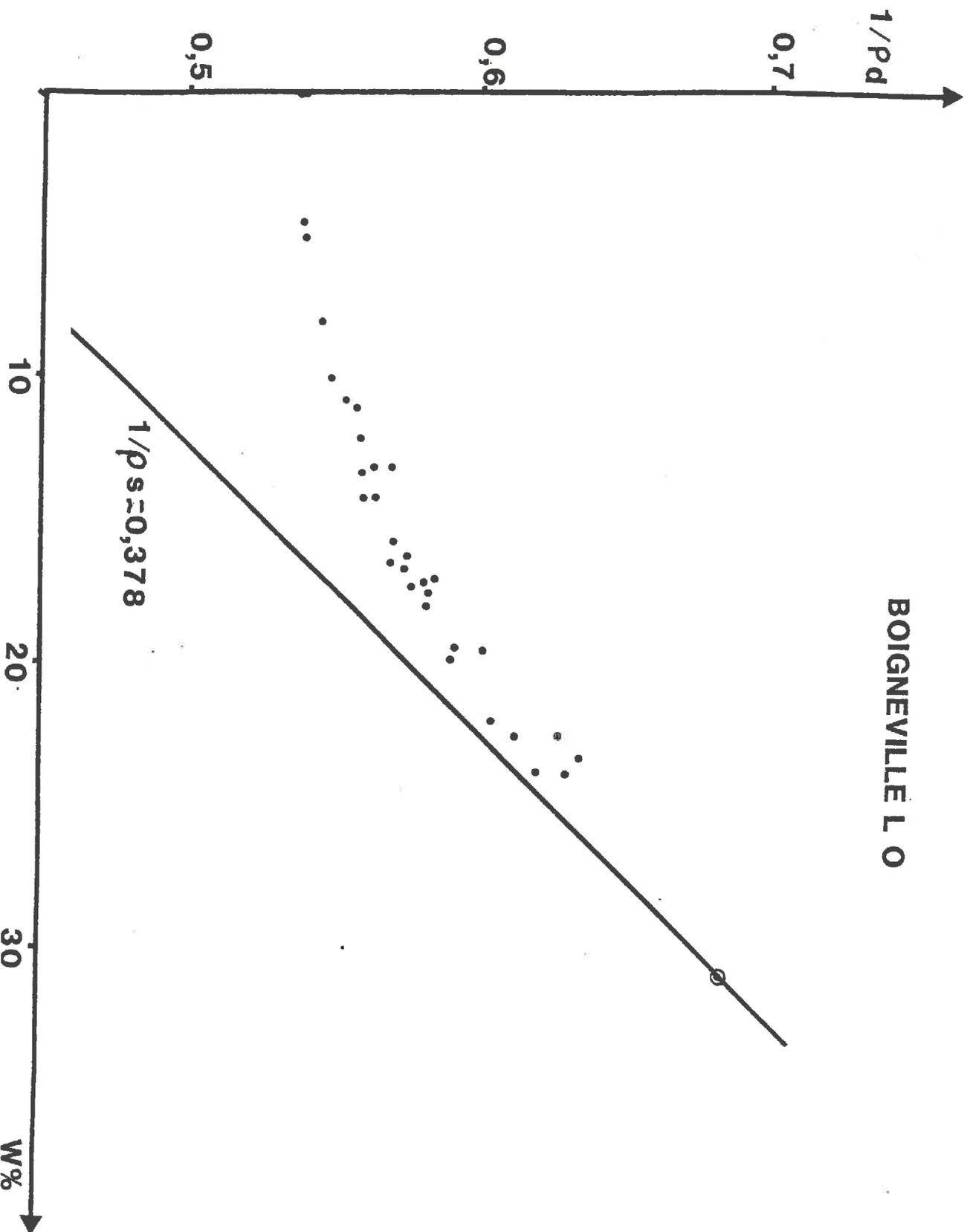
St. PAUL (0-20 cm)



BOIGNEVILLE L 2



BOIGNEVILLE L O



**Annexe 7 : Influence du nombre de morceaux après rupture
sur la résistance à l'écrasement des agrégats.**

L'influence du nombre de morceaux après rupture sur la résistance à l'écrasement d'un agrégat

Lors de la rupture, les agrégats se divisent en un certain nombre de morceaux M. En effet, sur les Vignères remaniés 20-40 et 40-60, les valeurs suivantes sont observées sur 120 mesures (agrégats de 2-3 mm non arrondis) :

M	% agrégats
2	56
3	40
4	4

Plus le nombre de morceaux après rupture M est grand, plus la surface de rupture est grande. On s'est demandé s'il n'y avait pas une proportionnalité entre σ et la surface de rupture totale. Dans ce cas, et en faisant l'hypothèse d'une simple proportionnalité entre M et la surface de rupture (surface totale = 1/2 section x nombre de morceaux), la variable $2\sigma/M$ devrait présenter une dispersion plus faible que σ . Nous avons donc calculé $2\sigma/M$ sur 60 individus pour chacun des deux échantillons.

		Variables	
		σ	$2\sigma/M$
Vignères 20-40	Moyenne	49,77	41,97
	Ecart-type	8,51	9,80
	CV en %	17,1	23,4
Vignères 40-60	Moyenne	65,42	53,99
	Ecart-type	13,24	11,51
	CV en %	20,2	21,3

La prise en compte de M ne semble pas réduire la dispersion des contraintes puisque les coefficients de variation de $2\sigma/M$ sont supérieurs ou du même ordre de grandeur que ceux de σ dans les deux cas.

Les deux histogrammes (Figures 3₁₃ et 3₁₄) de σ et $2\sigma/M$ pour les Vignères 40-60 montrent :

- Pour σ , les agrégats tels que F est faible ($M = 2$) sont pour la plupart situés dans les classes de faibles contraintes alors que ceux tels que $M = 3$ ne sont pas présents dans les deux classes de faibles contraintes. Ceci tendrait à prouver que plus M est petit, plus σ est petit donc que M est bien corrélé à la surface de rupture.

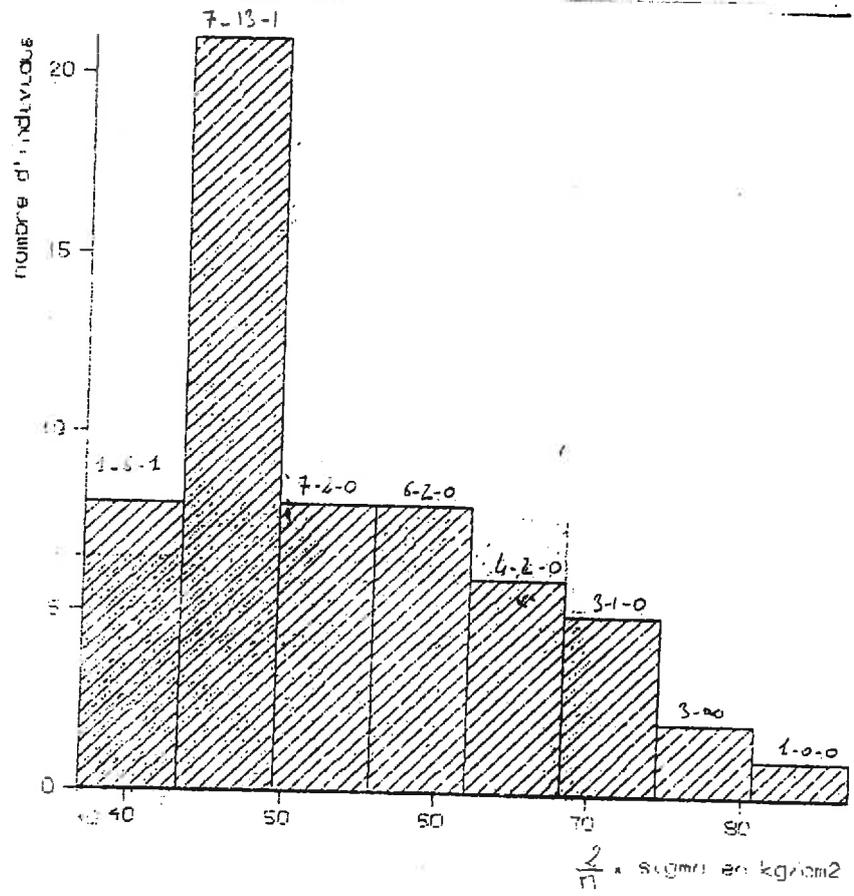
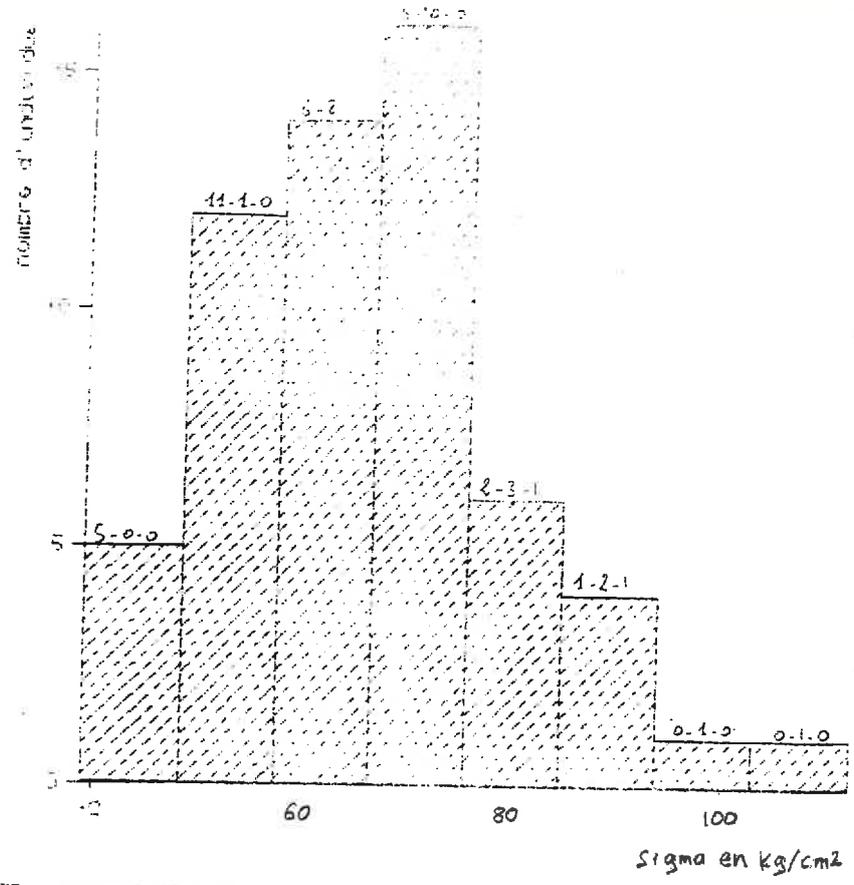
- Pour $2\sigma/M$, on observe le phénomène inverse c'est-à-dire que plus M est petit, plus $2\sigma/M$ est grand. Bien que M semble corrélé à la surface de rupture, cette corrélation n'est pas linéaire. C'est-à-dire que, si les 2 agrégats de même volume présentent l'un une rupture en 2 morceaux (et une surface de rupture S_2) et l'autre une rupture en 3 morceaux (et une surface de rupture S_3), on aura une forte probabilité que : $S_3 < 3/2 S_2$

Ainsi donc, il semble que dans le cas de rupture à surface complexe (différente d'un plan diamétral), une correction simple par le nombre de morceaux ne puisse pas être envisagée.



avec :

$x = \text{nb de individus } \pi = 2$
 $y = \pi = 3$
 $z = \pi = 4$



Figures 313 et 314 : Influence du nombre de morceaux après rupture (π) sur la résistance à l'écrasement (Vigneres 40-60 remanié)